AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE
PROCESSOS INDUSTRIAIS PELA TÉCNICA DE PERFILAGEM RADIOMÉTRICA**

Marcio Issamu Haraguchi

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo

#

#

São Paulo

2018

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE
PROCESSOS INDUSTRIAIS PELA TÉCNICA DE PERFILAGEM RADIOMÉTRICA**

Marcio Issamu Haraguchi

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientador:
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo

#
#

Versão Corrigida

São Paulo
2018

*Já não estaria ali,
em meio a tanta informação,
todas as nossas respostas?*

AGRADECIMENTOS

Esta tese condensa exatos 20 anos de experiência no escaneamento de colunas. Muitas pessoas e entidades tiveram importância ou colaboração fundamental nos conhecimentos e experiências adquiridos nesta trajetória.

História que se inicia na Divisão de Equipamentos de Processo da Confab Industrial S. A., com a oportunidade apresentada pelos engenheiros João Hayashi e Nelson Ueta, que me levaram ao mundo dos internos e colunas de processo industrial.

Caminho que tomou forma com a oportunidade oferecida para implantar o escritório da Tru-Tec Services do Brasil Ltda., por meio do qual iniciei o aprendizado da técnica de escaneamento de colunas. Nesta empresa, entre muitos mestres e amigos, ficam agradecimentos aos engenheiros Lowell T. Pless, Martin Rizo e Eduardo S. Velasco, bem como aos técnicos especialistas Ron Carlson e David Strangmeier. Graças também aos colegas de outros países que igualmente compartilharam deste caminho, especialmente os engenheiros John R. Robles da Scan Ar e Mauricio Vernal da SI3 Ingeniería SpA.

Este trabalho se concretizou por se focar no seu principal usuário: o cliente final, o engenheiro da fábrica que necessita das informações providas pela técnica, para o qual o método foi concebido de modo a ser prático, simples e rápido, permitindo que informações e decisões possam ser tomadas num prazo muito curto. Agradeço aos incontáveis profissionais com quem tive contato, em centenas de projetos espalhados em diversos países; que compartilharam suas preocupações, anseios, experiências e necessidades de ensaios. Este conhecimento efetivamente moldou o formato deste projeto.

A fundação da Tricom Tecnologia e Serviços de Manutenção Industrial Ltda., foi o ponto de partida para um estudo mais aprofundado da técnica e desenvolvimento de novas tecnologias. O apoio incondicional dos meus sócios engenheiro Joel L. Vargas Jr. e da Dra Maria da G. B. Anacleto foi fundamental para a continuidade deste desenvolvimento técnico. Agradecimentos aos engenheiros Fernando B. Loch, João C. Ferreira e aos técnicos Antonio C. Lima, Francis S. Beckmann e Bruno G. Martins pelo apoio nos mais diversos trabalhos, projetos e experimentos.

No Centro de Tecnologia das Radiações, do IPEN-CNEN/SP, uma parceria de trabalho deu início a um longo relacionamento do qual germinaram tanto esta Tese como, anteriormente, o trabalho de Mestrado; devo agradecimento mais do que especial ao apoio incansável do meu orientador Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo, cujo incentivo ao meu ingresso na pós-graduação é a semente da qual todo este trabalho deriva. Gratidão também a todo corpo docente e técnico do Instituto.

Outra parceria foi fundamental para a viabilidade de trabalho, pois em função da tecnologia desenvolvida no Laboratório de Processamentos de Sinais, do Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola Politécnica da USP (EPUSP) é que foi possível processar os dados e apresentar as imagens deste trabalho. Agradecimento em destaque ao Dr. Hae. Y. Kim, pelas inúmeras contribuições neste trabalho, e cujas ferramentas foram e ainda são importantes no desenvolvimento desta tecnologia.

Finalmente, agradecimento a minha esposa Giovana Barbieri Haraguchi, pelo apoio irrestrito e incentivo por toda esta jornada.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS PELA TÉCNICA DE PERFILAGEM RADIOMÉTRICA

Marcio Issamu Haraguchi

Resumo

A técnica de perfilagem gama de colunas de destilação já está no mercado há pelo menos 30 anos. Acompanhando o desenvolvimento tecnológico mundial, a técnica e a indústria prosperaram e se difundiu, podendo ser encontrada em diversos países e sendo implementada por diversas empresas comerciais e centros de pesquisa. Todavia, apesar das melhorias na qualidade dos resultados bem como na rapidez e praticidade da tomada de dados; o conceito básico da técnica permaneceu inalterado. Este trabalho condensa como o aprendizado de 20 anos, em *gamma scan* e tomografia industrial, propiciou fundamentos para uma técnica inovadora, testada em laboratório e depois efetivamente aplicada em condições reais de campo, que permitiu obter resultados nunca antes obtidos numa perfilagem de coluna.

DEVELOPMENT OF A RADIOMETRIC PROFILING TECHNIQUE IMAGING SYSTEM FOR PROCESS INDUSTRIAL EQUIPMENTS

Marcio Issamu Haraguchi

Abstract

Distillation column gamma scanning has been in the market for more than 30 years. Following world's technology development the industry grew and spread worldwide. Nowadays gamma scanning can be found in many countries performed by commercial companies and research centers either. However, in spite of all development achieved, resulting in high quality data and easy data sampling; the technology concepts remains the same. This work condense how 20 years apprentice ship in gamma scanning and industrial tomography, rise up fundamentals for an innovative technique, tested in laboratory scale and effectively applied in real field conditions; culminated in results that have never been obtained with a gamma scan.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	A PERFILAGEM DE COLUNAS.....	3
2.1	História.....	3
2.2	Conceito.....	3
2.3	Equipamento básico de escaneamento	5
2.4	Equipamentos de processo industrial	8
2.5	Vantagens.....	9
2.6	Limitações e dificuldades	11
2.6.1	Aspectos técnicos	11
2.6.2	Aspectos humanos	13
2.6.3	Tempo de experiência	14
2.6.4	Desenvolvimento e soluções	15
3	DESENVOLVIMENTO.....	17
3.1	Escaneamento de colunas	17
3.1.1	Tempo de aquisição.....	17
3.1.2	Determinação da fonte de radiação.....	19
3.1.3	Estatística versus velocidade	21
3.1.4	Saturação.....	22
3.1.5	<i>Threshold</i>	23
3.1.5.1	Conceito básico	24
3.1.5.2	Interpretação geométrica	28

3.2	Tomográfica Industrial Computadorizada	30
3.2.1	Reconstrução de imagens	31
3.2.2	Calibração	33
3.3	Imageamento de colunas	37
3.3.1	Conceito e protótipo laboratorial	37
3.3.2	Modelos de colunas de destilação	40
3.3.3	Modelos discretizados e simulação	44
3.3.4	ART versus MART	46
3.3.5	Colimação eletrônica e calibração	46
3.3.6	A Priori	48
3.3.7	Ângulo relativo e objetos verticais	49
4	TRANSIÇÃO LABORATÓRIO CAMPO	51
4.1	Ponto de partida	51
4.1.1	Equipamentos de campo	52
4.1.2	Colimação eletrônica	53
4.1.3	Fontes e detectores de radiação pontuais	54
5	PATENTES	57
6	RESULTADOS PRÁTICOS	58
6.1	Proposta de Teste	58
6.2	Primeiro imageamento feito na indústria	59
6.2.1	Resultados	62
6.3	Segundo imageamento	66
6.3.1	Desaerador	67

6.3.2	Resultados	69
6.3.3	Estudos adicionais	71
6.3.3.1	A priori.....	71
6.3.3.2	Influência do passo	72
6.3.3.3	Sistema multidetectores de radiação.....	74
6.4	Apresentações da tecnologia de imageamento	75
7	PONTOS A DESENVOLVER.....	77
8	CONSIDERAÇÕES	78
9	CONCLUSÃO	79
10	BIBLIOGRAFIA.....	80
	ANEXO I – Artigo Publicado Flow Measurement and Instrumentation	83
	ANEXO II – Pedido de Patente no INPI.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico de escaneamento de coluna. As diferentes linhas representam diversos perfis de densidade longitudinal inspecionados. Fonte: Tricom Tecnologia.	4
Figura 2 - Posicionamento dos equipamentos de escaneamento de coluna. As diferentes linhas representam diversos perfis de densidade longitudinal inspecionados. Fonte: Tricom Tecnologia.	5
Figura 3 - Esquema geral de um equipamento de processo industrial. Fonte: Tricom Tecnologia.	8
Figura 4 - Arranjos distintos de fonte-detector de radiação que apresentam a mesma densidade média.	12
Figura 5 - Trabalhos de campo desafiadores. Fonte: Tricom Tecnologia.	13
Figura 6 - Softwares modernos permitem uma análise mais precisa e rápida dos resultados colhidos. Fonte: Tricom Tecnologia.	16
Figura 7 - Intervalos de confiabilidade para valores de 100, 1.000 e 10.000 contagens.	18
Figura 8 - Diagrama do software de cálculo de atividade e normalização.	20
Figura 9 - Diagrama do software de estimativa de contagem obtida através de um vaso metálico.	20
Figura 10 - Mudança do intervalo de confiabilidade multiplicando e dividindo o tempo de aquisição por 10, para as contagens de 100 e 10.000.	22
Figura 11-Resultados da não linearidade de contagens de um detector de radiação de 1 pol. em saturação (Th: <i>Threshold</i>).	23
Figura 12 - Representação do espalhamento Compton.	24
Figura 13 - Energia e ângulo do fóton espalhado.	25

Figura 14 - Espectro de energia de uma fonte de Cs-137, obtida com um detector de NaI(Tl) de 3 x 3 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.....	26
Figura 15- Espectro de energia de uma fonte de Co-60, obtida com um detector de NaI(Tl) de 3 x 3 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.....	27
Figura 16 - Espectro de energia de uma fonte de Cs-137, obtida com um detector de NaI(Tl) de 2 x 2 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.....	28
Figura 17 - Fótons com 90 graus de espalhamento formados apenas ao longo de um círculo.....	29
Figura 18 - Apresentação das zonas limítrofes dos fótons espalhados com ângulo de 60° e 85°.....	30
Figura 19 - Reconstrução tomográfica a partir de projeções.....	31
Figura 20 - <i>Layout</i> típico de colunas de destilação. Fonte: Tricom Tecnologia.	32
Figura 21 - Projetos desenvolvidos nas indústrias: (a) tubo com depósito de coque na parede interna ($\varnothing = 0,15$ m); (b) linha de transferência de forno ($\varnothing = 2$ m); (c) tubo com interface de líquido ($\varnothing = 0,8$ m); e (d) distribuidor de gás danificado ($\varnothing = 7,8$ m). As cores representam uma escala de valores das densidades relativas obtidas. Fonte: Tricom Tecnologia.....	33
Figura 22 - Primeiro arranjo experimental de tomografia. Fonte: Tricom Tecnologia.....	34
Figura 23 - Tomografia de um vaso metálico com cilindro de chumbo.	34
Figura 24 - Tomografia de um vaso metálico com cilindro de poliuretano e tubo de aço carbono AISI1020.....	35
Figura 25 - Espectro de leitura de contagens num sistema monocal.....	36
Figura 26 - Proposta inicial para calibração específica de tomografia.	36

Figura 27 - Modelo geral e simulação de resultado de imageamento de um equipamento industrial.	38
Figura 28 - Esquema geral das posições fonte-detector de radiação.	38
Figura 29 – Detalhes do conceito geral do sistema de imageamento.....	39
Figura 30 - Vista geral do protótipo com o sistema mecânico de alinhamento fonte-detector de radiação.	39
Figura 31– Detalhe de montagem da fonte radioativa no porta-fonte (a) e detalhe do sistema colimador da fonte selada (b).	40
Figura 32– Detalhe do carro deslizante e colimador do detector de 1 pol. (a) e detector de radiação [NaI(Tl)] de 1 pol. montado no colimador (b).	40
Figura 33 – <i>Layout</i> básico de uma coluna de pratos (a) e uma de recheio (b).	41
Figura 34 - Modelo de coluna de pratos perfilados perpendicularmente aos vertedores (a), pratos e vertedores preenchidos com uma mistura de água e gel (b).	42
Figura 35 - Resultados obtidos do imageamento do modelo de coluna de pratos.....	42
Figura 36 - Posicionamento típico de um <i>grid-scan</i> em uma coluna de recheio.	43
Figura 37–Modelo de coluna de recheio (a) com problemas de distribuição de recheio e líquido (b).	43
Figura 38 - Resultados obtidos do imageamento do modelo de coluna de recheio.....	44
Figura 39 – Irradiação simulada de modelo discretizado de uma coluna de pratos (a) e imagem obtida (b).	45
Figura 40 - reconstrução de irradiação do modelo feito em <i>AutoCad</i> pelos métodos ART (a) e MART (b)	46

Figura 41 - Calibração otimizada para tomografia e imageamento.....	47
Figura 42 - Ângulo de espalhamento a energia de corte para imageamento com fontes de Co-60.....	47
Figura 43 - Zonas limítrofes dos fótons espalhados em até 25°.	48
Figura 44 – Modelos a priori simplificados (a) e complexo (b) da coluna de pratos.....	48
Figura 45 – Imagens de reconstrução direta (a); reconstrução com modelo a priori simplificado (b); e reconstrução com modelo a priori complexo (c).	49
Figura 46 – Aumento da espessura em função do ângulo relativo (α).....	49
Figura 47 – Efeito do aumento do “ μ ” aparente pelo mascaramento de objetos delgados.	50
Figura 48 - Três possibilidades de posicionamento para a movimentação do detector de radiação, com suas respectivas sombras, no equipamento de processo.	53
Figura 49 - Arranjo do posicionamento relativo entre fonte e detector de radiação.....	55
Figura 50 - Resultado das medições do arranjo da Figura 50.....	55
Figura 51 - Croquis dos suportes de fonte e detector de radiação adaptados.	59
Figura 52 - Funcionamento esquemático de um prato tipo <i>ripple</i>	60
Figura 53 - Croquis da coluna de separação e geometria do imageamento (mm).	61
Figura 54 - Mapa de posicionamentos da fonte e do detector de radiação. ...	61
Figura 55 - Orientação do escaneamento no distribuidor de líquido, no topo da coluna.	62

Figura 56 - Imageamento de uma coluna de destilação industrial (sem dados a priori) (a) e o correspondente escaneamento convencional (b). Fonte: Tricom Tecnologia.....	64
Figura 57 - Alturas aproximadas de líquido aerado e dimensão do distribuidor.	64
Figura 588 - Modelo de distribuição a priori da coluna (a) e reconstrução do equipamento real usando o conhecimento a priori (b).	65
Figura 59 - Distribuição esperada de densidades em funcionamento normal e sua reconstrução (a); distribuição de densidades e reconstrução de pratos inundados (b); e distribuição de densidades de pratos danificados (c).....	66
Figura 60 - Croqui do desaerador do tipo pulverizador avaliado.....	67
Figura 61 - Orientações (a) e gráficos de escaneamento convencional (b) obtidos.....	68
Figura 62 - Geometria de imageamento empregada.....	69
Figura 63 - Mapa de posicionamentos da fonte e do detector de radiação.	69
Figura 64 - Imagem reconstruída em comparação com o escaneamento convencional feito na mesma corda.....	70
Figura 65 - Uso do aprimoramento de imagem com a priori. Imagem inicial (a); modelo a priori (b); e imagem resultante (c).	72
Figura 66 - Imagens reconstruídos ao simular diferentes passos na tomada de dados.....	73
Figura 67 - Imagem reconstruída a partir de um passo de 50 cm no detector e 10 cm na fonte de radiação.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energias dos picos de retroespalhamento e degrau Compton para fontes radioativas de Cs-137 e Co-60.26

Tabela 2 - Variação percentual das leituras em relação à posição vertical (270°).56

Tabela 3 - Relação passo com quantidade de pontos e tempo de execução.73

1 INTRODUÇÃO

A técnica de perfilagem de colunas de destilação, também conhecida pela sua designação em Inglês "*gamma scanning*" (Charlton, 1986), ou pelo anglicismo "escaneamento" de colunas; foi proposta nos anos 60 e está comercialmente disponível há mais de 30 anos (Severance, 1981). Neste período, a indústria de *gamma scan* incorporou continuamente inovações tecnológicas como microeletrônica, computação e softwares, resultando num grande ganho de qualidade e velocidade do trabalho de campo. Outros avanços estenderam o alcance da interpretação dos dados retornando informações praticas para os diversos ramos da engenharia envolvidos (Kister et al., 2017; Outili et al., 2013). Apesar disso, em sua essência, não houve mudança em seu conceito de funcionamento: ainda se trata da análise do perfil de atenuação da radiação que atravessa o equipamento em estudo.

A revista americana *Chemical Processing* publicou o artigo "*Gamma scanning seeks an inside edge*" (Spear, 2007), aonde diretores e empresas de *gamma scan* nos EUA e Canadá, discorriam sobre as dificuldades da tecnologia e propostas para o futuro do mercado. Há tempos a indústria procurava pelo "*high definition gamma scan*", ou escaneamento de alta definição, termo sem definição exata que designaria uma inovação que levaria a técnica a um novo patamar, talvez melhorando a qualidade dos resultados, talvez facilitando sua interpretação. Outras melhorias foram implementadas desde então (Pless, 2014; Tracerco, 2011) sem, todavia, alterar o fundamento da técnica.

A partir de 2006 com a fundação da empresa brasileira Tricom Tecnologia, iniciou-se uma revisão dos conceitos empregados no *gamma scan* com o intuito de melhor compreender e até mesmo nacionalizar a tecnologia. Esforços para obter uma tecnologia de tomografia industrial computadorizada iniciaram-se em 2008 resultando nos primeiros trabalhos comerciais já em 2009. Deste projeto surgiram as bases da técnica de imageamento de colunas, implementada como trabalho de mestrado em 2013. O conhecimento adquirido ao longo destes anos permitiu a

implementação em condições reais de campo da técnica de imageamento de colunas, trabalho inovador que é apresentado neste trabalho.

2 A PERFILAGEM DE COLUNAS

2.1 História

O escaneamento de colunas apareceu como uma das tecnologias desenvolvidas nos anos 60 quando a então *Imperial Chemical Industries* do Reino Unido criou o setor de *Physics and Radioisotope Service* em Billingham, também no Reino Unido, que desenvolvia tecnologias e serviços internos para o grupo. Tempos depois, em 1986, este grupo gerou a Tracerco uma divisão de serviços internacionais estabelecida em Billingham e em Pasadena, EUA.

Toda uma geração de empresas, abertas por ex-funcionários, surgiram desta escola: *Tru-Tec Services* (Houston, EUA - hoje incorporada pela Tracerco), *NSS* (Houston), *Towerscan* (Alberta, Canadá), *Scan Tech* (Edmonton, Canadá), *Quantum Technical Services* (Houston), *Tricom Tecnologia* (Piquete, Brasil), *Scan Ar* (Buenos Aires, Argentina), *Cordova Group* (Maracaibo, Venezuela) e *Ig3* (Santiago, Chile). Não por acaso, todas estas empresas tem tecnologias e serviços similares, empregando conceitos e métodos desenvolvidos décadas atrás. Os trabalhos técnicos publicados e referências geradas por estas empresas tem influenciado toda outra geração de empresas e centros de pesquisa mundo afora.

2.2 Conceito

Um escaneamento nada mais é do que o processo pelo qual se obtém o perfil de densidades longitudinal de um equipamento, obtido a partir da atenuação de um feixe de radiação ao atravessar um meio. A atenuação da radiação por um meio pode ser expressa com a lei de Beer-Lambert (Equação 1):

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

Na qual, I_0 é a intensidade inicial do feixe de radiação, μ é o coeficiente de atenuação linear do meio para uma determinada energia, x é a espessura do objeto

e I é a intensidade de radiação medida. Este perfil de densidades é normalmente apresentado na forma de um gráfico XY, mostrado na Figura 1, aonde a densidade relativa é apresentada no eixo das abscissas e a altura da coluna no eixo da ordenadas. Valores de densidades absolutas nem sempre são apresentados em face da dificuldade de calibração dos instrumentos com os arranjos de campo.

Figura 1- Gráfico de escaneamento de coluna. As diferentes linhas representam regiões onde se obtiveram diversos perfis de densidade . Fonte: Tricom Tecnologia.

Uma inspeção por escaneamento típico pode contar com mais de um perfil de densidades, posicionados ao redor da coluna de acordo com a constituição dos internos (designação genérica aos equipamentos de processo contidos no interior da coluna) e da estratégia do teste, mostrados nas Figuras 1 e 2.

Figura 2 - Posicionamento dos equipamentos de escaneamento de coluna. As diferentes linhas representam diversos perfis de densidade longitudinal inspecionados. Fonte: Tricom Tecnologia.

2.3 Equipamento básico de escaneamento

A principal qualidade de um equipamento de escaneamento deve ser a confiabilidade uma vez que frequentemente a oportunidade para realizar uma inspeção é única, seja por conta das condições operacionais da planta industrial, seja por conta da agenda e disponibilidade da equipe. Além disso, equipamentos utilizados rotineiramente em condições de campo precisam ter as seguintes características:

- **Simplicidade** - qualquer equipamento deve ser fácil de montar, preparar, testar e operar uma vez que, no campo, nem sempre há condições ou tempo para ajustes elaborados ou demorados.
- **Manutenção** - um jogo de equipamentos estará sempre viajando. Sua manutenção, tanto na empresa como em campo, deve ser simples e feita com equipamentos e materiais também simples e disponíveis localmente. Uma sistemática de manutenção pré e pós-viagens deve ser elaborada para evitar contratempos durante o trabalho. Igualmente uma metodologia de manutenção, substituição e reposição de componentes e peças deve ser implementada. Equipamentos importantes devem ser duplicados.
- **Robustez** - os equipamentos devem suportar dias de operação contínua, sem a necessidade de manutenção ou maiores reparos, em ambientes com condições climáticas (chuva, sol, frio e calor) e ambientais (impacto,

vibração, poeira, gases e vapores) adversas. Suas embalagens de transporte precisam suportar igualmente as mesmas condições severas no uso, armazenamento e transporte.

- **Leveza** - apenas uma pequena porção das unidades de processo industrial conta com elevadores de acesso. Assim, é desejável que os materiais de trabalho sejam compactos e leves, pois na maior parte das unidades o acesso é feito por escadas.

A configuração dos equipamentos de escaneamento pode variar bastante a depender também:

- Disponibilidade de materiais e equipamentos no mercado local;
- Facilidade de aquisição ou importação;
- Capacidade de projeto e manufatura da empresa;
- Custo-benefício; e
- Filosofia de trabalho - equipamentos leves, portáteis e flexíveis versus equipamentos maiores, pesados e pouco flexíveis, mas que trabalham mais rápido.

Em geral, pode-se dividir os equipamentos em 4 (quatro) partes:

- **Fontes Radioativas** - para inspecionar os vasos de pressão comumente encontrados na indústria, necessitam-se empregar fontes radioativas de médias e altas energias com fótons capazes de atravessar suas paredes, internos e processo. Fontes com apenas um ou 2 (dois) fotopicos, tais como o Cs-137 (0,66 MeV), Co-60 (1,17 MeV e 1,33 MeV), Na-22 (1,28 MeV) ou Sc-46 (0,89 MeV e 1,12 MeV) já foram empregados no escaneamento de colunas. Fontes com meia-vida elevada são desejáveis para seu custo de aquisição seja diluído num longo período de utilização. Conforme a atividade diminui uma fonte pode ser empregada no diagnostico de equipamentos de menor porte, e até eventualmente para aferição de instrumentos ou experimentos;
-

-
- **Detectors e eletrônica de medição** - para atender os requisitos de campo e, ao mesmo tempo, obter boa estatística de contagem com os menores tempos de leitura possíveis, os detectores cintiladores de NaI(Tl) com fotomultiplicadores tem sido a melhor opção já há muitos anos, pelo custo benefício. Detectores com cristais de 1 x 1 polegada e 2 x 2 polegadas são os mais comumente empregados, por conta da pequena área de seção transversal, todavia em aplicações especiais cristais de 3 x 3 polegadas já foram empregados também. A eletrônica de medição mais comum empregada são os SCA (*Single Channel Annalizer* - analisador de um canal) dotados de circuitos discriminadores de pulso (ou discriminação de energia), que provou mais do que suficiente para a contagem de espectro de energia adotada neste tipo de inspeção. Instrumentos dotados de bateria interna, para autonomia da rede elétrica e porta de comunicação com computadores são itens essenciais também. Equipamentos modernos migraram a comunicação para o *Wifi*, com circuitos de alimentação elétrica, discriminação e contagem embutido no corpo dos detectores de radiação;
 - **Hardware e softwares** - a adoção de computadores portáteis facilitou muito o trabalho de escaneamento e aumentou muita a eficiência da técnica, ao permitir visualizar os dados coletados imediatamente. Muitas gerações de computadores já foram empregadas na história da indústria como computadores pessoais, *laptops*, *palmtops*, PDAs (*Personal Digital Assistance*) até os baratos *notebooks*. A evolução da indústria também pode ser vista nos softwares empregados para coleta e preparação dos gráficos, de sistemas escritos em *Basic* com uso de *plotters* de mesa, até sistemas multitarefas com interface via *Web*; e
 - **Acessórios** - uma serie de outros equipamentos são necessários ao trabalho, entre os principais se destacam os sistemas de posicionamento e colimação. Os sistemas de posicionamento auxiliam a manter a fonte e o detector na orientação de trabalho desejada e são responsáveis por indicar também a elevação donde se encontram; sendo que o sistema mais comum emprega cabos de aço e medidores lineares de cabo. A depender da filosofia de trabalho este sistema pode ser manual, semiautomático ou automático. O sistema de colimação filtra parte da
-

radiação espalhada e auxilia também a reduzir o raio de isolamento da área restrita em torno da fonte, efetivamente permitindo que a equipe de trabalho permaneça na coluna durante o processo de escaneamento.

2.4 Equipamentos de processo industrial

Para melhor compreender a importância de um escaneamento para a indústria é preciso descrever, de maneira geral, os equipamentos de processo industrial. Salvo exceções, como colunas de pesquisa, de serviços especiais como ácido nítrico ou que dispõem de algum bocal tipo visor; a maioria dos equipamentos de processo são vasos de pressão metálicos e hermeticamente fechados. Logo, salvo os desenhos de processo, projeto mecânico e montagem final, pouca informação sobre o arranjo de suas partes internas e do comportamento do processo em seu interior, efetivamente está disponível.

Nas plantas modernas, toda uma rede de instrumentação de dados (temperaturas, pressões, vazões e níveis, dentre outros) e análises (consumo energético, composição de matéria primas e produtos) alimenta modelos de simulação, que permitem entender e vislumbrar parte de seu funcionamento.

Figura 3 - Esquema de um equipamento de processo industrial. Fonte: Tricom Tecnologia.

Todavia, modelos de processo baseiam-se em características fixas, que não devem mudar ao longo da operação do equipamento, tais como:

-
- **Físicas** – dimensões, área e volume dos internos, funcionamento hidráulico do equipamento e componentes, nivelamento e vibração;
 - **Processuais** – pureza da matéria prima, fenômeno físico-químico preponderante e composição de matérias primas e aditivos; e
 - **Operacionais** – taxas de refluxo, tempo de residência, distribuição de fluxos, perfis de temperatura, pressão e vazão, entre outras.

Além disso, nenhum modelo consegue adaptar-se a fatores aleatórios e inesperados:

- **Problemas físicos** – corrosão e entupimentos de componentes, danos mecânicos por fadiga ou sobrecarga;
- **Problemas de processo** – contaminação de matéria-prima, produtos de corrosão, fenômeno físico-químico inesperado, por exemplo: sedimentação, saturação, polimerização, gelo, coqueamento;
- **Problemas operacionais** – distúrbios operacionais na fábrica, falsa indicação de instrumentos, falta de energia elétrica; e
- **Problemas humanos** – problemas de montagem ou projeto, adaptações, falhas durante reparos e liberação de equipamentos em paradas, operações não rotineiras, acidentes, paragens bruscas do processo, entre outros.

2.5 Vantagens

Como pôde ser visto no item 2.4, há muitos fatores que podem afetar negativamente o desempenho de um equipamento de processo industrial. Seus impactos são visualizados, em geral, apenas pelos desvios das variáveis de processo: seja alterando temperaturas e pressões, deslocando pontos de fracionamento, na composição dos produtos e efluentes, dentre outros. Ainda que a fábrica tenha um bom controle de manutenção e reparos, bom histórico de registros, boa instrumentação e bom corpo de engenharia e operação; há muitas ocasiões em que ora não é possível apontar para um problema exato no equipamento, ora há

mais de um problema que pode causar os sintomas observados, ora não há muito tempo hábil para a tomada de decisões.

O custo operacional de qualquer tipo de intervenção numa planta industrial é altíssimo, pois além do custo da manutenção (homem-hora, materiais, suporte, planejamento), há de se incluir o custo operacional (perda de lucros, necessidade de armazenamento de produtos, outros). Não raro, os valores giram na casa de milhões de reais diários de perda de faturamento.

Esta é a conjuntura que torna os ensaios não destrutivos (END) como o escaneamento de colunas muito atrativo para as empresas. Com um custo relativamente baixo (comparado a qualquer intervenção no equipamento) e com um prazo de execução e análise bastante rápido (dias) uma empresa tem condições de obter informações vitais para a tomada de decisões, tais como:

- Confirmação da existência ou não de problemas;
- A localização e extensão dos problemas;
- Qual o tipo e origem do problema;
- Verificar a eficácia de manobras operacionais para contornar o problema;
- Verificar hipóteses sobre a origem e comportamento de problemas; e
- Comparar degradação ou melhoria da condição atual com o histórico de testes anteriores.

Com estas informações a empresa tem condições de tomar medidas estratégicas ou de contingência importantes: manter o equipamento em operação, planejar uma parada de manutenção com um escopo de trabalho já definido ou até mesmo decidir se por uma parada emergencial imediata.

Além deste alcance imediato destas técnicas, seu emprego tem se estendido, para além das engenharias de processos e operações, a outros campos da engenharia nas plantas industriais:

- **Engenharia de manutenção** – avaliação preditiva de equipamentos críticos ou sujeitos a deterioração;
 - **Planejamento de parada** – pré-avaliação de equipamentos para a definição de escopo de trabalhos numa parada, influenciando no planejamento de abertura de equipamentos, compra de insumos, alocação de mão de obra, serviços e equipamentos de apoio;
-

- **Projetos e revamps** - testes *on-line* são úteis no planejamento de modificações ou ampliações, verificando e documentando gargalos operacionais, acompanhamento de partidas de novos equipamentos, execução de testes de referência (*baselines*) e estudo de desempenho; e
- **Pesquisa** - apesar dos avanços observados nos simuladores de processo e na fluidodinâmica computacional, escaneamentos tem sido empregados tanto em instalações experimentais e industriais para melhor entender e documentar o comportamento dinâmico dos processos.

2.6 Limitações e dificuldades

Como toda tecnologia, o escaneamento de colunas tem limitações e dificuldades que tanto impossibilitam sua aplicação como atrapalham um maior emprego na indústria.

2.6.1 Aspectos técnicos

A própria definição de escaneamento dá pistas sobre seus limites técnicos, tal como, o perfil longitudinal de densidades relativas médias:

- **Contagem de radiação** - a precisão dos valores de densidade relativa obtidos depende da estatística de contagem de radiação, que por sua vez depende do tempo disponível para o teste, da taxa de contagem, ou efetivamente, da atividade da fonte disponível e do equipamento de detecção empregado. Na prática, não raras vezes, a estatística de contagem está longe do ideal, mas a que é possível em função da limitação de tempo seja por conta de limitações operacionais, seja pelas condições de campo (luminosidade e clima), seja por conta da jornada de trabalho. Assim, os escaneamentos limitam-se aos casos aonde é possível medir valores de contagem estatisticamente válidos aonde parâmetros como a atividade da fonte, sua energia, a eficácia dos detectores, a calibração empregada, a espessura, o tamanho e a constituição do equipamento em análise são fundamentais na análise de viabilidade de um projeto. A limitação de dose equivalente da equipe de trabalho é igualmente relevantes (Sanches, et al., 2007) na estimativa do tempo de trabalho e logo do tempo de amostragem praticado; e

- **Densidade** - as contagens registradas após a atenuação do feixe de radiação num determinado caminho, relaciona-se à densidade média ali presente. Assim, especialmente em equipamentos de maior dimensão, a perfilagem tende a esconder problemas e fenômenos, devido as grandes estruturas de suporte e também a baixa vazão de líquido usualmente associada. Logo, a análise de um escaneamento deve ser sempre considerar esta característica e um cuidado especial na interpretação dos dados deve ser tomado. A Figura 4 ilustra 2 (dois) arranjos diferentes que tem a mesma densidade média, resultando na mesma medida de contagens, mas tem características notadamente diferentes. Por isso, o posicionamento usual dos escaneamentos busca seções com densidade média ou comportamento similar, para que um fenômeno ou feição da coluna não mascare outro.;

Figura 4 - Arranjos distintos de fonte-detector de radiação que apresentam a mesma densidade média.

- **Orientação** - um escaneamento é um registro de densidades médias (Figura 4), e uma interpretação destes dados só fará sentido se as características do objeto em estudo forem, aproximadamente, uniformes ao longo do plano longitudinal definido pelo feixe de radiação. Isso limita bastante as possibilidades de posicionamento e os tipos de perfil de densidades que podem ser obtidos. Muitas vezes, equipamentos de constituição complexa são difíceis ou tem análise limitada ou até impossíveis de serem inspecionados (Urbanskiet al., 1999); e
- **Dimensão espacial** - apesar de um escaneamento mover-se em um plano vertical, os seus resultados indicam apenas a densidade média em função da elevação do equipamento, ou seja, é uma visão unidimensional do equipamento.

2.6.2 Aspectos humanos

Apesar de envolver conceitos simples e que podem ser facilmente formatados em procedimentos de trabalho técnico, o trabalho de escaneamentos de colunas envolve uma série de outros conhecimentos e aptidões da equipe de trabalho que se, por um lado, requerem treinamento especializado e tempo de experiência, por outro, são uma característica inerente da pessoa. Este conjunto de habilidades torna o perfil de um especialista bastante raro, e interfere diretamente na qualidade dos dados obtidos e na veracidade do relatório redigido. Por isso, a seleção e treinamento de pessoal é historicamente um dos maiores problemas enfrentados pelo segmento:

Figura 5 - Trabalhos de campo desafiadores. Fonte: Tricom Tecnologia.

- **Trabalhos com radiação** - o temor de se trabalhar com materiais radioativos pode ser superado com treinamento apropriado, conforme mostrado na Figura 5. Além disso, um técnico precisa aprofundar-se nos conhecimentos específicos de radioproteção, tais como, cuidados com a dose de radiação, manuseio de fontes radioativas, atenuação e detecção da radiação, colimação, espalhamento e retroespalhamento,

conhecimentos sobre fontes, energia, calibração, instrumentação, transporte e armazenamento, dentre outros.

- **Trabalho em campo** - numa época em que o trabalho tornou-se sedentário, a disposição para sair a campo precisa ser inata. Há de se ter uma aptidão para trabalhar em ambientes externos, ruidosos, sob intempéries, perigosos, longas jornadas, além de agenda flexível e pré-disposição para viagens não programadas;
- **Autonomia** - mesmo dispondo de formas de comunicação quase que imediatas, uma equipe em geral está isolada. Um técnico precisa ser independente, capaz para contornar problemas mecânicos, elétricos, eletrônicos e interferências;
- **Persistência** - não raro, é preciso serenidade para suspender ou refazer todo o trabalho feito. Buscar o melhor resultado muitas vezes entra em conflito com a agenda e a disposição física da equipe;
- **Comunicação** - um técnico precisa ter habilidade em preparar e conduzir apresentações orais, bem como para transcrever em texto técnico os resultados, limitações e problemas encontrados, explicar de fenômenos e propor soluções. O domínio de outras línguas é importante também; e
- **Interpessoais** - a capacidade de trabalhar em equipe e com as outras equipes envolvidas no projeto, bem como relacionar-se com as equipes de segurança, lidando com o mito da radiação é desejável, além da capacidade de comunicação, persuasão e liderança.

2.6.3 Tempo de experiência

Além de conhecimento e aptidão, um técnico especialista forma-se com o tempo, sendo preciso participar de muitos projetos para que domine alguns assuntos que são o cruzamento de diversas áreas de conhecimento:

- **Avaliações preliminares** - um especialista precisa conhecer limitações e alcance da técnica, prevendo possíveis resultados e informações que sejam de interesse, avaliar a atividade de fonte e taxa de contagem necessária, propor estratégias de trabalho e coleta de dados;
-

- **Trabalhos prévios** - somente com algum tempo de experiência um técnico terá conhecimentos sobre o processo e equipamento em estudo, tido contato com casos semelhantes, observado o resultado obtido com propostas de testes alternativos; e
- **Interpretação de dados** - também é preciso algum tempo de escaneamento para que a experiência ajude a julgar e filtrar todo o tipo de interferências nos dados resultantes de problemas ou características do equipamento.

2.6.4 Desenvolvimento e soluções

A indústria de escaneamento incorporou e desenvolveu tecnologias ao longo dos anos com o intuito de facilitar os trabalhos de campo e apresentação dos resultados, aonde se destacam:

- A miniaturização de componentes eletrônicos permitiu que os equipamentos ficassem menores e portáteis, portanto, mais fáceis de transportar e mover ao longo da coluna. Também aumentou sua autonomia e robustez, o que permite jornadas de trabalho maiores e em condições mais adversas. Sistemas sem fio tem sido a última palavra em comunicação de dados;
- Softwares mais modernos permitem coletar e avaliar os dados de maneira mais rápida, permitindo analisar o problema sem a necessidade de impressão (Figura 6). A customização de relatórios ficou mais fácil com rotinas que automatizam o trabalho de análise;
- Computadores cada vez menores e com mais recursos permitem que a tomada de dados e a preparação de gráficos fiquem cada vez mais fácil. Sistemas operacionais multitarefa permitem executar varias tarefas ao mesmo tempo como coletar dados, efetuar cálculos, consultar desenhos e relatórios anteriores. Equipamentos de baixo custo ou para ambientes adversos permitem adequar o material de trabalho para condições específicas; e

Figura 6 - Softwares modernos permitem uma análise mais precisa e rápida dos resultados colhidos. Fonte: Tricom Tecnologia.

- Sistemas automatizados de movimentação de instrumentos prometem agilizar e facilitar a tomada de dados.

Também se desenvolveram várias técnicas para melhorar a qualidade dos resultados:

- Múltiplos escaneamentos ou escaneamentos na forma de grade (*grid-scans*) são efetuados com o intuito de obter alguma noção de distribuição espacial de densidades;
- Técnicas de tomografia industrial de colunas para avaliar seções transversais das colunas foram desenvolvidas;
- Testes de referência ou *baselines*, nos equipamentos mais críticos das unidades, já são praticas comuns. *Baselines* podem ser feitos com o equipamento parado (registro da parte física) ou em condições ótimas de operação (registro da parte física e processo); e
- Novos algoritmos permitem determinar o carregamento de líquido (*liquid holdup*) dentro dos leitos de recheio e estimar melhor o carregamento de líquido em pratos.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento da técnica que imageamento de colunas por raios gama aconteceu por etapas à medida que alguns conceitos empregados tradicionalmente na indústria eram questionados e novas proposições eram testadas e aplicadas como rotina de trabalho.

3.1 Escaneamento de colunas

3.1.1 Tempo de aquisição

Um escaneamento típico de colunas toma dados a cada 5 cm ou 20 pontos por metro de inspeção e assim, qualquer teste pode conter facilmente algumas centenas de posicionamentos e medições. Desconsiderando o tempo necessário a preparação, a montagem e desmontagem, bem como manobras e imprevistos, o tempo total de inspeção ainda é bastante impactado pelo tempo levado para posicionar os instrumentos, fazer a leitura e registrar cada dado.

Uma equipe experiente ou um sistema automatizado pode mover os instrumentos em questão de poucos segundos, assim como, equipamentos e computadores modernos podem efetuar a medição, transmiti-la e registrá-la num tempo ainda menor. Em 2006, no projeto de um novo sistema de escaneamento para a empresa Tricom Tecnologia, questionou-se qual o tempo de aquisição que deveria ser empregado, pois até então o valor mínimo de amostragem era de 2,4 segundos. Esse tipo de limitação era imposto, em parte, em função dos *palmtops*, memórias e softwares ainda empregados à época, que podiam falhar caso a taxa de aquisição de dados fosse muito mais rápida.

Para um determinado arranjo ou, no caso do escaneamento de colunas, para uma dada posição fonte-detector de radiação, o valor da contagem de radiação (C), medido depende apenas do tempo de leitura e o desvio padrão (σ) desta leitura é definido como sua raiz quadrada (Equação 2):

$$\sigma = \sqrt{C} \quad (2)$$

Idealmente, requer-se que os dados encontrem-se dentro do melhor intervalo de confiabilidade, por exemplo, num intervalo 3σ , a confiabilidade de 99,73% de uma contagem C ficaria compreendido entre (Equação 3):

$$C - 3\sigma \leq C \leq C + 3\sigma \quad (3)$$

As variações de densidade num escaneamento são exponenciais (Equação 1). Por esse motivo, os dados são melhores representados num gráfico com escala logarítmica no eixo das ordenadas. Ali a variação 3σ do intervalo de confiabilidade em torno de um valor de contagem é mais notável para valores baixos de contagem do que para valores elevados como pode ser visto no escaneamento mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Intervalos de confiabilidade para valores de 100, 1.000 e 10.000 contagens.

Estudando estes resultados sob o ponto de vista de uma análise de escaneamento, a diferença na precisão dos dados pode ser um pouco relativizada por alguns fatores:

- Experimento envolvendo contagens de radiação, a contagem de um feixe que atravessasse o equipamento deve ser maior do que os valores de radiação de fundo (BG) local, idealmente cerca de 10 vezes maior. Ainda que um levantamento total destes valores não esteja sempre disponível, os valores de radiação de fundo, em geral, são maiores ao nível do solo e diminuem em direção ao alto do equipamento, de modo que os valores ao nível do solo são geralmente tomados como referência;

- Contagens de radiação próximas ao valor de BG, não indicam necessariamente que os dados são ruins ou inválidos, mas, sim, que o meio analisado é muito denso e atenuou quase todo o feixe de radiação. Observar que o intervalo de confiança é mais largo para baixas contagens, significando que grandes diferenças de contagens ali não significam necessariamente grandes variações no resultado. A localização de interfaces num escaneamento é justamente feito pela análise desta característica, procura-se nestes casos a variação de densidade e não os valores exatos de contagem;
- Contagens de radiação em torno de 1 (uma) ou 2 (duas) centenas podem indicar meios aonde o processo é bastante dinâmico, como interfaces. Neste caso, variações nos valores de leitura são esperadas e uma tomada de dados mais demorada faz com que se perca um pouco a sensibilidade neste sentido. Também pode indicar locais aonde os internos são mais densos e atenuam parte significativa da radiação como em leitos de recheio. Neste caso, a quantidade de líquido que atenua a radiação é pequeno e contagens sucessivas tendem a retornar valores similares.

Como visto, a definição de um tempo de contagem considera que além da precisão numérica bruta, o tempo despendido no trabalho e a importância relativa dos dados têm maior peso estratégico na escolha.

Com o advento de computadores mais rápidos e softwares de aquisição de dados mais confiáveis, logo no início dos testes para do novo software de aquisição de dados propôs-se a realização de testes de escaneamento com 1 segundo de contagem. Neste período de desenvolvimento, que levou cerca de 1 ano, não observou-se nenhum problema de comunicação com relação aos softwares de aquisição e armazenamento dos dados. Na maioria das situações, não se observou também nenhuma perda significativa na qualidade dos dados com relação a testes anteriores feitos com tempos e amostragem maiores, de modo que o tempo de amostragem de 1 segundo foi mantido como novo padrão.

3.1.2 Determinação da fonte de radiação

Como as dimensões dos equipamentos de processo variam bastante, os trabalhos de escaneamento de colunas necessitam que uma empresa disponha de

uma ampla gama de atividades de fontes radioativas. Para determinar rapidamente atividades e fatores de normalização para diferentes datas das diversas fontes que a empresa dispõe é interessante desenvolver um programa dedicado. Na Figura 8 é mostrado o diagrama do programa desenvolvido.

Figura 8 - Diagrama do software de cálculo de atividade e normalização.

Durante o desenvolvimento do software de aquisição de dados, foram elaboradas tabelas e correlações práticas para a determinação das contagens de radiação esperadas através de um vaso de pressão. Valores práticos mínimos de contagens para escaneamentos de torres de pratos e torres de recheio também foram determinados. Na Figura 9 é mostrado o diagrama desta avaliação.

Figura 9 - Diagrama do software de estimativa de contagem obtida através de um vaso metálico.

Como o inventário de fontes de uma empresa é fixo, há muitas situações aonde a atividade da fonte é pequena ou grande demais para um dado vaso metálico. Nestas situações há 2 (duas) alternativas:

- Aumentar o tempo de contagem de uma fonte de menor atividade, melhorando a estatística em detrimento a um maior tempo de trabalho de campo; e

- Atenuar uma fonte de maior atividade, adicionando material absorvedor, aumentando-se o peso dos instrumentos.

A solução final depende ainda de fatores como tempo disponível para teste, região de interesse para escaneamento, disponibilidade de outras fontes de radiação, dentre outros.

3.1.3 Estatística versus velocidade

Conforme descrito no item 3.1.2, há situações em que se necessita aumentar o tempo de contagem para melhorar a estatística da medição. Supondo que dados estejam sendo colhidos numa base de tempo (t) ao aumentarmos o tempo de aquisição por um fator constante (A), colhendo assim os dados num maior intervalo de tempo (t_1) os valores da contagem (C) e seu desvio(σ) na base de tempo original (t), são obtidos dividindo valor medido (C_1) e o seu desvio (σ_1) pelo mesmo fator (Equação 4):

$$t_1 = A \times t \Rightarrow C = \frac{C_1}{A} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{\sigma_1}{A} \quad (4)$$

Por outro lado, o tempo total de um trabalho pode ser reduzido diminuindo-se o tempo de aquisição à custa de uma piora na estatística. Ao dividir o tempo de aquisição por um fator constante (B) obtemos os valores da contagem (C) e seu desvio(σ) na base de tempo original, multiplicando valor medido (C_2) e o seu desvio (σ_2) pelo mesmo fator (Equação 5):

$$t_1 = \frac{t}{B} \Rightarrow C = C_1 \times B \quad \text{e} \quad \sigma = \sigma_1 \times B \quad (5)$$

Em geral, a escolha da base de tempo de um escaneamento leva em conta principalmente o tipo de resultado que se espera obter. Aumentar a base de tempo é interessante em locais aonde os valores de contagem são baixos e se necessita observar uma melhor definição dos valores relativos de densidade (por exemplo, ao se determinar a distribuição de líquido num leito de recheio). Por outro lado, não tem muita relevância nos locais aonde uma grande densidade ou baixo valor de contagem é esperado e uma melhor definição da densidade não resulta numa melhor interpretação dos resultados. Diminuir a base de tempo é interessante, ao

reduzir bastante o tempo de trabalho, em locais aonde a taxa de contagem é alta e por consequência, a estatística de contagem já é satisfatória.

Na Figura 10 é mostrado como a estatística de contagem pode melhorar ou piorar conforme a escolha, comparando-se com a Figura 7.

Figura 10 - Mudança do intervalo de confiabilidade multiplicando e dividindo o tempo de aquisição por 10, para as contagens de 100 e 10.000.

3.1.4 Saturação

Num trabalho de escaneamento tenta-se empregar a menor fonte possível para uma coluna por dois motivos principais: segurança radiológica, por conta do menor raio de isolamento e menor taxa de dose de radiação; e pela maior praticidade, com contêineres mais leves e fáceis de transportar. Apesar disto, sempre há situações que, seja por causa das dimensões do vaso ou disponibilidade de fontes, geram altas taxas de contagens que podem ocasionar a saturação da resposta do detector.

A saturação de uma fotomultiplicadora acoplada a um cristal de NaI(Tl) ocorre quando a quantidade de fótons oriundos do cristal que chega à fotomultiplicadora é muito grande, ocorrendo o efeito espaço-carga nos dipolos, principalmente nos últimos estágios, reduzindo os elétrons coletados e resultando, por fim, numa queda das contagens registradas e consequente perda da linearidade de resposta.

Para detectar o início da saturação, um teste prático consiste em analisar graficamente contagens no ar a diferentes distâncias. Na Figura 11 são mostrados os resultados de um sistema em saturação, num gráfico em escalas logarítmicas, para diversos valores de *Threshold* (energia de corte). O efeito da saturação é mais evidente para energias de corte maior, que é justamente importante neste trabalho.

No escaneamento de colunas, que trabalha com limiar de *Threshold* menor e com em maiores contagens, a perda de linearidade é menos óbvia. Definimos um limiar de saturação como um valor de contagem a partir do qual há uma variação de inclinação máxima permissível ou o ponto a partir do qual o ajuste de reta tem um erro maior que o mínimo permissível.

Na prática, verificou-se que fotomultiplicadoras de menor diâmetro ou volume tem maior propensão à saturação.

Figura 11-Resultados da não linearidade de contagens de um detector de radiação de 1 pol. em saturação (Th: *Threshold*).

Reconhecer o ponto de saturação tem importância prática e logística. Quando a contagem máxima que um conjunto fonte-detector pode trabalhar é alcançada, deve-se trabalhar a maiores distâncias ou empregando alguma forma de atenuação na fonte radioativa ou no detector de radiação, ou utilizando outra fonte.

3.1.5 *Threshold*

Em seu início, os trabalhos de escaneamento de colunas preocupavam-se em obter apenas o registro das densidades relativas, bastando para isso medir o espectro geral das energias dos fótons emergentes do vaso metálico. Alguma discriminação de energia já era empregada apenas para retirar as contribuições da radiação de fundo e o ruído eletrônico (ambos, em geral, no baixo espectro de energia).

Por muitos anos, convencionou-se o ajuste dessa discriminação em 200 keV para torres de pratos e 400 keV para torres de recheio. Neste último caso, provavelmente já se considerava a influência das radiações espalhadas num escaneamento de uma torre com recheios, ainda que as referências técnicas não

deixassem isso claro. O escaneamento de colunas de pratos em 200 keV, todavia, resultava numa maior propensão aos efeitos da radiação espalhada (*scattering*) especialmente quando o detector estava próximo a alguma estrutura metálica espessa. A abordagem mais comum, então, era planejar os trabalhos, evitando pelo posicionamento em campo dos instrumentos esse tipo de interferência nos dados. Algumas equipes modificavam os ajustes de calibração de forma não específica como redução na alta voltagem (HV) ou aumento do valor de discriminação (Th), que não eram, todavia, o procedimento padrão.

3.1.5.1 Conceito básico

O principal mecanismo de interação com a matéria das fontes gama empregadas no escaneamento de colunas é o espalhamento Compton, aonde um fóton incidente interage com um elétron do meio absorvedor perdendo energia e sendo defletido num ângulo θ em relação à direção original, mostrado na Figura 12:

Figura 12 - Representação do espalhamento Compton.

Neste tipo de interação a energia do fóton espalhado pode ser expressa pela Equação 6:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (6)$$

A Equação 6 pode ser representada graficamente, conhecendo-se as energias dos fótons incidentes, como é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Energia e ângulo do fóton espalhado.

As energias do pico de retroespalhamento ($\theta = \pi$) e do degrau Compton, podem ser calculadas pelas Equações 7 e 8:

$$h\nu'_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \quad (7)$$

$$E_e = h\nu - h\nu' \quad (8)$$

Observar que o valor de discriminação de energia de 200 keV até então empregado está muito próximo das energias retroespalhamento das fontes gama empregadas, como apresentado na Tabela 1. Assim, qualquer escaneamento feito com base neste ajuste de calibração seria mesmo muito suscetível à ocorrência de interferências por espalhamento como se efetivamente observava em campo. As Figura 14 e Figura 15 mostram os espectros de energia das fontes de Cs-137 e Co-60 obtidos com um detector de NaI(Tl) de 3 x 3 polegadas num sistema multicanal em laboratório (baixo ruído eletrônico), numa leitura direta da fonte pelo detector (sem meio qualquer absorvedor), boa geometria e eficiência, e isolado (pouca radiação de fundo). Pode-se observar que a região do platô Compton (região compreendida entre o pico de retroespalhamento e o degrau Compton) corresponde a uma boa parcela dos fótons registrados.

Tabela 1 - Energias dos picos de retroespalhamento e degrau Compton para fontes radioativas de Cs-137 e Co-60.

Radioisótopo	Pico Retroespalhamento E_{γ} (keV)	Degrau Compton E_e (keV)
Co-60 (γ_1)	209,8	963,4
Co-60 (γ_2)	214,4	1.118,1
Cs-137	184,3	477,3

Figura 14 - Espectro de energia de uma fonte de Cs-137, obtida com um detector de NaI(Tl) de 3 x 3 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.

O espectro de energias varia conforme cada arranjo físico e depende da geometria do objeto medido e do tipo de colimação empregado. Num escaneamento de colunas a quantidade de radiação espalhada é muito maior, em função do vaso e internos metálicos, ao processo e ao próprio equipamento de medição. Comparados com o detector de 3 pol., os de 1 ou 2 polegadas tem pior resolução do fotopico e a contribuição da região do platô Compton no espectro é significativa em relação ao total de contagens medidas. Além disso, a geometria da irradiação muda a cada posicionamento havendo mais ou menos espalhamento conforme se muda a elevação. Logo, torna-se necessário um ajuste que reduza a influencia do espalhamento nas medições efetuadas.

Figura 15- Espectro de energia de uma fonte de Co-60, obtida com um detector de NaI(Tl) de 3 x 3 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.

Uma forma simples de atenuar a radiação espalhada medida pelo detector é aumentando a colimação tanto da fonte como do detector. Colimar a fonte adiciona a dificuldade de alinhamento entre as janelas da fonte e do detector. No escaneamento isso é extremamente difícil, em função das dificuldades de acesso e visualização dos colimadores. A melhor alternativa é a de empregar colimadores com janelas panorâmicas que atenuam pouco a radiação na direção horizontal e bastante na direção vertical. Sua principal função é a de diminuir a taxa de exposição para a equipe de trabalho, conseqüentemente, o raio da área isolada em torno do equipamento. Todavia, qualquer aumento da colimação também resulta no aumento do peso e volume dos instrumentos o que dificulta e retarda a execução dos trabalhos.

A alternativa mais viável é a de aumentar a energia de corte utilizada nos ajustes dos instrumentos. Na Figura 13 pode-se observar como o aumento da energia de corte corresponde a contar apenas os fótons espalhados dentro de um ângulo máximo. Por exemplo, todo o espectro de uma fonte de Cs-137 podia ser visto com um limiar de 200 keV. Ao aumentarmos o valor para 400 keV, apenas os fótons desviados em até 60 graus podem ter energia suficiente para serem medidos.

Na Figura 16 é mostrado o espectro de energias obtido de uma fonte não colimada de Cs-137 medido por um detector colimado de NaI(Tl) de 2 x 2 polegadas num sistema mono canal ajustado para medir energias em faixas de 0,1 keV. Observar como o espectro no platô Compton mudou nitidamente (em comparação com a Figura 14) com a mudança do arranjo físico e também das diferenças de

resolução entre os detectores. Note adicionalmente como mudam os valores de contagem (área hachurada), com a variação das energias de discriminação.

Aumentando a energia de corte para 400 keV, conseguiram-se 2 (dois) efeitos interessantes para o escaneamento de colunas. O primeiro é a supressão dos fótons de baixa energia oriundos do retro espalhamento que é o objetivo inicial da mudança. O segundo efeito vem da limitação do ângulo de espalhamento. Como pode ser visto na Figura 13, o limiar de 400 keV limita o ângulo de espalhamento a cerca de 85 graus para fontes de Co-60.

Figura 16 - Espectro de energia de uma fonte de Cs-137, obtida com um detector de NaI(Tl) de 2 x 2 polegadas e indicação das energias de discriminação empregadas.

3.1.5.2 Interpretação geométrica

A Figura 17 ilustra uma constatação geométrica simples: dada uma fonte e um detector de radiação, separados por uma distância D , se discriminarmos os fótons por um valor de energia de corte (Th) de modo que apenas aqueles com 90 graus de espalhamento sejam registrados pelo detector, estes últimos só podem ser formados ao longo de um círculo cujo diâmetro corresponde à distância fonte-detector.

Figura 17 - Fótons com 90 graus de espalhamento formados apenas ao longo de um círculo.

Note que como as colisões são inelásticas, fótons originados do lado externo do círculo tem energia menor que o valor de corte e, fótons originados do lado interno tem energia maior que o valor de corte, ou seja, fótons com energia maior que a energia de corte pode originar-se apenas do interior desta região.

Ao empregar uma energia de corte de 400 keV, as fontes de Cs-137 e Co-60 tem o ângulo de espalhamento limitado a 60 e 85 graus, respectivamente. Os fótons com energia de 400 keV são formados ao longo da curva azul mostrada na Figura 18, que fica inscrita dentro do círculo cujo diâmetro é a distância fonte-detector de radiação.

Assim, lembrando que os equipamentos de processo são vasos metálicos, em geral, cilíndricos; que a colimação da fonte é panorâmica; e que os fótons registrados ao utilizar-se uma energia de discriminação de 400 keV, originam-se dentro de uma região limitada pelo ângulo de espalhamento, pode se intuir então que as contagens medidas são representativas apenas dos internos e processos no interior do vaso na elevação que o escaneamento está sendo feito, que é o outro efeito positivo do aumento do limiar de energia.

Apesar de, aparentemente, fótons espalhados podem vir de locais distantes do eixo fonte-detector de radiação, donde se quer efetivamente medir o perfil de densidades; na prática sua quantidade deve ser menor em função da configuração dos internos, do processo e do corpo do equipamento. Adicionalmente, o espalhamento da radiação, explica porque o comportamento da densidade média obtida nos resultados de um escaneamento é referido a um feixe largo, e não estreito, de radiação (observar as transições de menor densidade para maior

densidade, mostradas na Figura 1). Uma questão comum argumenta por que as transições de densidade não são abruptas já que tanto a fonte como o detector de radiação tem dimensões quase que pontuais em relação ao tamanho da coluna. A resposta está no espalhamento mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Apresentação das zonas limítrofes dos fótons espalhados com ângulo de 60° e 85°.

3.2 Tomográfica Industrial Computadorizada

Novas tecnologias como a tomografia industrial (IAEA, 2008) foram introduzidas no mercado (Xuet al., 1999), apesar de se tornarem comuns nas aplicações de pesquisa (Busciglio, et al., 2017) há ainda poucos casos de usos comerciais no setor de END (Wolschlag et al., 2010, Tracerco, 2013). O desenvolvimento de uma metodologia própria para escaneamento de colunas resultou numa série de procedimentos que foram testados no dia a dia da empresa e formam a base do desenvolvimento de uma tecnologia de tomografia industrial (Haraguchi, 2010) e apesar de seus conceitos serem conhecidos 2 (duas) questões precisaram ser respondidas. A primeira é encontrar um método de reconstrução de imagens que se adequasse a realidade de campo. A segunda, compreender e ajustar melhor o processo de detecção da radiação para que um sistema mais preciso e prático pudesse ser empregado.

3.2.1 Reconstrução de imagens

O problema fundamental da tomografia consiste em obter a representação espacial de um objeto quando se dispõe apenas de projeções de alguma característica física, mostrado na Figura 19. Propriedades como impedância, capacitância, velocidade podem ser empregadas para gerar imagens tomográficas (Kalagaet al.,2009), mas, no caso de equipamentos de processo, emprega-se a atenuação da radiação pelo meio representada pela Equação 1, por sua capacidade de atravessar meios densos como líquidos e paredes metálicas.

Figura 19 - Reconstrução tomográfica a partir de projeções.

Uma característica pouco levada em consideração nos projetos de tomografia industrial é a geometria dos equipamentos de processo em análise. A maioria dos projetos considera arranjos lineares, circulares ou de segmento de círculo que são fixos para um determinado diâmetro ou faixas de diâmetro. Todavia, salvo o formato circular, os equipamentos de processo podem variar muito com relação ao diâmetro, espessura de paredes e tipo de isolamento térmico, o que torna um arranjo fixo de uso limitado. Apesar dos aparatos poderem ser adaptados para outras dimensões, essa possibilidade pode ser tanto onerosa como demorada demais para a realidade de uma empresa de diagnósticos de processos.

Outra característica comum é a ordenação do arranjo. Na maioria dos projetos, posições para a fonte e os detectores de radiação seguem uma ordem pré-determinada e fixa, o que é provavelmente é uma limitação imposta pelo método de reconstrução comumente empregado (Pan et al., 2009). Além disso, a série de dados deve ser completa, ou seja, não é possível obter nenhuma imagem se não houver dados de todos os posicionamentos. Empregar este tipo de desenho na prática seria muito difícil, pois cada equipamento de processo tem diferentes arranjos físicos, acessórios externos e forma de acesso, dentre outros, mostrado na

Figura 20. Adicionalmente, dados de campo sempre são propensos a falhas e, muitas vezes, não há outra chance para uma retomada de dados. Assim, é necessário dispor de uma tecnologia que proporcione uma grande flexibilidade de montagem, podendo ser empregado em diversas situações sem a necessidade de maiores adaptações, bem como convergir numa solução mesmo com a ausência de todos os dados.

Figura 20 - *Layout* típico de colunas de destilação. Fonte: Tricom Tecnologia.

A partir de meados de 2008, a Tricom Tecnologia e o Laboratório de Processamentos de Sinais (LPS), do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP (EPUSP), iniciaram uma cooperação para desenvolver uma metodologia própria de tomografia computadorizada industrial com diversos experimentos sendo conduzidos nas instalações da empresa e dados sendo pós-processados na Universidade. Os resultados destas experimentações indicaram que os algoritmos iterativos derivados do ART (*Algebraic Reconstruction Technique*) e do MART (*Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique*) (Oliveira et al., 2011), são os que melhor se encaixaram dentro das necessidades do projeto, pois permitem montar qualquer tipo de arranjo com um número ilimitado de posicionamentos para fonte e detector de radiação. Como não há posições determinadas para instalar os instrumentos, regiões de difícil acesso ou que apresentem algum tipo de interferência, podem ser evitadas, sem impacto na obtenção de imagens ainda que,

localmente, possa ocorrer alguma perda de qualidade. Por outro lado, com um número ilimitado de posicionamentos podem-se tomar mais dados nas regiões de maior interesse, para que a imagem ali tenha melhor qualidade.

Na Figura 21 é mostrado o resultado de alguns projetos desenvolvidos com esta tecnologia, usando séries totalmente diferentes de arranjos de dados. Considere a notação (F x D) que indica o número de posições para a fonte (F) e detector (D ou Di), com o indicador “i” significando uma série incompleta de dados no detector de radiação. Na Figura 21 as tomografias industriais foram tomadas com as seguintes séries: (a) 9 x 9, (b) 9 x 17, (c) 8 x 13 e (d) 9 x 17i. Note também a variação de diâmetro em que a técnica foi empregada.

Figura 21 - Projetos desenvolvidos nas indústrias: (a) tubo com depósito de coque na parede interna ($\varnothing = 0,15$ m); (b) linha de transferência de forno ($\varnothing = 2$ m); (c) tubo com interface de líquido ($\varnothing = 0,8$ m); e (d) distribuidor de gás danificado ($\varnothing = 7,8$ m). As cores representam uma escala de valores das densidades relativas obtidas. Fonte: Tricom Tecnologia

3.2.2 Calibração

A partir de maio de 2008, uma série de experimentos simples foi conduzida nas instalações da Tricom Tecnologia para avaliar que tipo de resultado poderia ser obtido com o conhecimento até então disponível. Na Figura 22 é mostrado o arranjo

experimental empregado em uma das primeiras reconstruções tomográficas obtidas. Apesar da simplicidade do experimento, o mesmo foi importante ao indicar que era possível desenvolver uma metodologia própria apesar de muitos estudos, experimentos e ajustes tivessem que ser ainda efetuados.

Figura 22 - Primeiro arranjo experimental de tomografia. Fonte: Tricom Tecnologia.

Este primeiro experimento de tomografia foi executado empregando o procedimento usual de calibração de escaneamento de colunas, modificando apenas o valor do *Threshold* para 7 ou 700 keV, já prevendo a necessidade de uma energia de corte mais elevada. Empregou-se um detector de 1 pol. e uma fonte de Co-60 não colimada com 19 mCi de atividade. O resultado da tomografia claramente indicou a localização do tambor de água, mas não conseguiu determinar sua dimensão nem identificar as latas cheias de serragem. A região superior da imagem não identificou o formato circular do tambor, em função da proximidade do tambor com o perímetro dos posicionamentos.

Nas Figura 23 e 24 são mostrados resultados dos experimentos realizados, com o intuito de entender e visualizar limitações da técnica. Estes testes foram feitos dentro de um vaso em aço carbono AISI1020, com 508 mm de diâmetro e paredes de 14 mm de espessura, replicando algumas condições comumente encontradas na indústria.

Figura 23 - Tomografia de um vaso metálico com cilindro de chumbo.

Figura 24 - Tomografia de um vaso metálico com cilindro de poliuretano e tubo de aço carbono AISI1020.

As reconstruções das imagens indicam que o sistema conseguia determinar a posição dos objetos dentro do vaso não importando se o meio era mais ou menos denso que o objeto em seu interior. Os resultados não visualizavam bem a borda dos objetos nem determinava bem suas densidades, apesar de estimar bem as diferenças de densidade relativa. Para obter imagens de melhor qualidade, resolvendo a posição, dimensão e a densidade dos objetos em estudo era preciso, então, investigar e aprimorar o método de calibração até então empregado.

Num sistema de escaneamento convencional, há maior interesse nas contagens brutas a partir de uma determinada energia do que na resolução das energias dos fótons medidos. Na Figura 25, o valor das contagens obtidas num ajuste com *Threshold* (Th, energia de corte) de 5 ou 500keV, num sistema mono canal é equivalente a área hachurada. Pode-se também delimitar uma janela de medição (*Window*), mas ela é em geral desativada (*Off*) para que todo o espectro de energias acima do *Threshold* seja medido.

A calibração da escala de energias do equipamento é feita usando uma fonte com energia conhecida, ajustando o valor do dial de *Threshold* para que o fotopico da fonte coincida com um determinado valor da escala de modo a existir uma correspondência direta entre o valor ajustado no dial e a energia escolhida (Cs-137 com 661,6 keV e Th em 6,62 resultando em 100 keV por volta).

Os analisadores monocanais empregados na indústria de escaneamento tem, em geral, um dial de *Threshold* com 10 voltas, como o SCA Ludlums 2200 empregados neste trabalho. Num sistema de escaneamento calibrado, os fotopicos de uma fonte com energia superior a 1.000 keV, como o Co-60, ficarão fora da

escala do Dial e os fótons acima deste valor apesar de serem contados não podem ser discriminados.

Figura 25 - Espectro de leitura de contagens num sistema monocal.

A primeira proposta de alteração no método de calibração para tomografia industrial consistiu em calibrar o sistema com o fótópico do Cs-137 um pouco abaixo da metade da escala do *Threshold* ($Th = 4,7$). Na Figura 26 são mostrados espectros obtidos para uma fonte de Cs-137 e de uma fonte de Co-60 com o sistema assim calibrado, observar também que o método ainda não provia uma relação linear entre canais e energia. A energia de corte foi definida num valor de Threshold de 6 ou 848 keV.

Figura 26 - Proposta inicial para calibração específica de tomografia.

A imagem tomográfica obtida na Figura 21 (a) foi obtida a partir desta proposta de calibração, e os primeiros trabalhos comerciais foram implementados a partir deste ponto.

3.3 Imageamento de colunas

A experiência com tomografia industriais convencionais empregando os métodos aritméticos de reconstrução permitiu observar uma característica importante: as reconstruções tomográficas usando os métodos aritméticos independem de uma geometria fonte-detector de radiação definida. Logo, desde que as posições dos instrumentos sejam conhecidas pode-se obter a reconstrução tomográfica a partir de qualquer posicionamento da fonte e do detector. Esta é a característica fundamental a partir da qual surgiu o conceito do imageamento de colunas.

A prova do funcionamento deste conceito foi apresentada na Dissertação de Mestrado intitulada "Imageamento de Equipamentos de Processos Industriais pela Técnica de Perfilagem por Raios Gama", defendida em abril de 2013, que resultou no pedido de patente junto ao INPI (Protocolo de Depósito BR 10 2012 024416-0), laureado com o Premio Petrobras de Tecnologia 2013 para trabalhos de mestrado na categoria de Refino e Petroquímica. O resumo do trabalho é apresentado nesta seção.

3.3.1 Conceito e protótipo laboratorial

No sistema de imageamento proposto, a fonte radioativa e o detector de radiação movem-se no mesmo plano ao longo de duas retas verticais que são paralelas ao eixo do equipamento de processo. Por sua vez, os eixos dos colimadores da fonte e do detector se mantêm alinhados por um sistema de posicionamento. A Figura 27 ilustra um modelo de funcionamento e uma previsão para o tipo de imagem gerada e na Figura 28 é mostrado o posicionamento relativo entre fonte e detector de radiação.

A partir deste conceito projetou-se no laboratório do Centro de Tecnologia das Radiações, do IPEN-CNEN/SP um protótipo capaz de irradiar objetos com 1,9 m de altura por 1 m de largura e 50 cm de profundidade. Nas Figuras 29 a 32 ilustram-se detalhes construtivos do protótipo empregado para a irradiação dos modelos de coluna de destilação construídos.

Figura 27 - Modelo geral e simulação de resultado de imageamento de um equipamento industrial.

Figura 28 - Esquema geral das posições fonte-detector de radiação.

Figura 29 – Detalhes do conceito geral do sistema de imageamento.

Figura 30 - Vista geral do protótipo com o sistema mecânico de alinhamento fonte-detector de radiação.

Figura 31– Detalhe de montagem da fonte radioativa no porta-fonte (a) e detalhe do sistema colimador da fonte selada (b).

Figura 32– Detalhe do carro deslizante e colimador do detector de 1 pol. (a) e detector de radiação [NaI(Tl)] de 1 pol. montado no colimador (b).

3.3.2 Modelos de colunas de destilação

As colunas de destilação podem ser divididas entre 2 (dois) tipos principais de acordo com o tipo de interno que é montado em seu interior. No primeiro tipo, genericamente denominado de "colunas de pratos", o contato líquido e vapor é feito forçando-se a passagem do vapor pelo líquido com o auxílio de anteparos metálicos que fazem o líquido percorrer um caminho sinuoso por dentro do vaso, mostrado na Figura 33a. No outro grupo, denominado de "colunas de recheio" (Figura 33b), o líquido é forçado a escoar na forma de filme através do recheio, que é um componente com grande área superficial que preenche um volume no interior do vaso metálico, entrando em contato com o vapor.

Figura 33 – *Layout* básico de uma coluna de pratos (a) e uma de recheio (b).

Dois modelos de colunas foram construídos, simulando condições difíceis de serem inspecionadas pelo método de escaneamento tradicional: avaliação de uma coluna de pratos perpendicularmente aos vertedores (Figura 34) e, avaliação de recheio com vazios e a má distribuição de líquido (Figura 37).

Colunas equipadas com pratos são perfiladas, em geral, pela sua região ativa ou valvulada como é mostrado na Figura 2, pois é nesta posição que o perfil de densidade retrata apenas o líquido aerado que está sobre cada prato. Em qualquer outro posicionamento haverá a interferência ou sobreposição, dos vertedores dos pratos dificultando a interpretação dos dados. A proposta para o modelo construído é efetuar um escaneamento perpendicularmente aos vertedores da coluna, com o objetivo de discernir as diferentes feições que num escaneamento convencional ficariam sobrepostas.

Figura 34 - Modelo de coluna de pratos perfilados perpendicularmente aos vertedores (a), pratos e vertedores preenchidos com uma mistura de água e gel (b).

Figura 35 - Resultados obtidos do imageamento do modelo de coluna de pratos.

No escaneamento tradicional de uma coluna de recheio, uma avaliação geral da distribuição de líquido pode ser feita por meio de um escaneamento na forma de grade, denominado *grid-scan* (Xu, 2000), mostrado na Figura 36. Todavia, não é possível avaliar qual a distribuição de densidades ao longo destes planos verticais, pois os valores médios de densidade mascaram qualquer desvio que exista. A técnica de imageamento é uma tendência para a investigação mais aprofundada da distribuição de líquido (Spiegel et al., 2003).

Figura 36 - Posicionamento típico de um *grid-scan* em uma coluna de recheio.

O modelo de coluna de recheio da Figura 37, utilizado nos experimentos, propõe um problema de distribuição tanto de recheio como de processo severo com vazios, desnivelamentos e regiões densas. Este tipo de problema nunca pôde ser detectado através de escaneamentos tradicionais (Figura 38).

Figura 37—Modelo de coluna de recheio (a) com problemas de distribuição de recheio e líquido (b).

Figura 38 - Resultados obtidos do imageamento do modelo de coluna de recheio.

3.3.3 Modelos discretizados e simulação

Não havendo espalhamento da radiação pelo efeito Compton, a atenuação da radiação seguiria estritamente a lei de Beer-Lambert apresentada na Equação 1. Neste caso, as contagens obtidas poderiam ser calculadas conhecendo-se apenas as espessuras e coeficientes de atenuação lineares dos meios que o feixe de radiação atravessou, dado que as posições da fonte e do detector são conhecidas.

As primeiras reconstruções do imageamento de uma coluna de pratos foram feitas com base em um desenho CAD, a partir do qual foram tabuladas todas as distâncias e espessuras envolvidas. Numa etapa seguinte, codificou-se um software que permitia discretizar uma coluna na forma de um mapa de pixels de "m" linhas por "n" colunas. Os valores e unidades de m e n podem ser arbitrários. Contudo, quanto mais refinado este mapa de pixels mais próximo do modelo real fica a discretização, com valores em torno de 2 a 3 pixels por mm gerando ótimos resultados. Cada cor de pixel representa também um material com coeficiente de atenuação linear distinto. Outro programa permitia simular a irradiação do modelo discretizado a fim de se obter os dados para uma reconstrução de imagem. Na Figura 39 é mostrada a discretização e irradiação de um modelo de coluna de pratos com sua imagem tomográfica reconstruída.

Figura 39 – Irradiação simulada de modelo discretizado de uma coluna de pratos (a) e imagem obtida (b).

A discretização de objetos e a simulação de dados de irradiação foram importantes ao permitir testar softwares, arranjos experimentais e checar possíveis resultados, sem a necessidade de se efetuar uma irradiação real. Além disso, permitiu introduzir o conceito de a priori, detalhado no item 3.3.6.

As reconstruções obtidas pelo método MART resultam em imagens mais nítidas e com melhor contorno de borda, observadas na Figura 40. Contudo, o método MART (*Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique*) limita-se por não aceitar densidades negativas em nenhuma etapa do processamento, e sua aplicação mostrou-se difícil, pois valores negativos tendem a aparecer no processamento pela limitação imposta no ângulo relativo reduzido e da dificuldade do algoritmo resolver a contribuição no aumento dos “ μ s” decorrentes dos objetos delgados. Assim, no restante do trabalho, empregaram-se principalmente o método ART (*Algebraic Reconstruction Technique*).

3.3.4 ART versus MART

Figura 40 - reconstrução de irradiação do modelo feito em *AutoCad* pelos métodos ART (a) e MART (b)

3.3.5 Colimação eletrônica e calibração

A colimação eletrônica emprega o sistema de *Threshold* e *Window* dos analisadores monocanal de forma que apenas a região dos fotopicos do espectro de energia seja computada. Assim, pode-se empregar equipamentos com o mínimo de colimação tornando o sistema de imageamento leve e compacto. A qualidade de imagens reconstruídas com o uso de dados obtidos apenas sob o fotopico (ao invés de todo o espectro) com o uso de colimação eletrônica, ainda que resulte em dados com maior variação, apresenta melhor resultado (Kim, J. et al., 2011).

Apesar dos bons resultados obtidos nos projetos de tomografia industrial a partir da primeira proposta de calibração, para o projeto de imageamento era preciso estabelecer um método que restrinja ainda mais os fótons a serem medidos, para que exista uma melhor qualidade na reconstrução de imagem e dos valores dos coeficientes de atenuação linear (μ_s). Na Figura 26 nota-se que a energia de corte empregada ($Th = 6$), parece ainda distante da região do fotopico da menor energia do Co-60. Além disso, pode-se notar que o sistema não é linear, com os valores de *Threshold* correspondendo a uma energia um pouco maiores (925 keV ao invés de 848 keV).

Para obter um melhor controle sobre a energia de corte, propôs-se alterar a calibração para trazer os fotopicos mais próximos ao centro da escala do dial de

Threshold, adotando um fator de 0,5 ou 200 keV por volta, nos valores e posicionando o fotopico do Cs-137 no valor de 3,31. O valor de *Threshold* para a energia de corte foi fixado em 5,4. Os espectros de uma fonte de Cs-137 e de uma fonte de Co-60 atenuada são mostrados na Figura 41. Observa-se que existe maior linearidade na calibração com o valor de *Threshold* de 5,4 correspondendo a uma energia de 1.060 keV ao invés de 1.080 keV. A posição da energia de corte (Th = 4,3) usada anteriormente é representada com uma linha pontilhada, da onde se observa que a calibração atual torna mais restrita a discriminação dos fótons.

Figura 41 - Calibração otimizada para tomografia e imageamento.

A Figura 42 ilustra como mudam os ângulos máximos de espalhamento com a mudança do limiar de corte para uma fonte de Co-60. O fóton de maior energia fica limitado a 25 graus e o de menor a 16 graus. A Figura 43 ilustra a zona limítrofe dos fótons espalhados em até 25 graus para mostrar como a área de espalhamento fica reduzida.

Figura 42 - Ângulo de espalhamento a energia de corte para imageamento com fontes de Co-60.

Figura 43 - Zonas limítrofes dos fótons espalhados em até 25°.

3.3.6 A Priori

Uma reconstrução algébrica pode iniciar-se com uma resposta vazia ou com um palpite qualquer, com o processo iterativo corrigindo palpites errados e mantendo inalteradas as corretas. Todavia, o palpite inicial não precisa ser aleatório e, a partir, de uma boa interpretação de resultados existentes e de informações do equipamento, pode-se elaborar um palpite que se aproxime bastante do resultado real, num processo também iterativo. Estes modelos podem ser simples ou mais complexos a depender apenas das informações disponíveis (Figura 44).

Figura 44 – Modelos a priori simplificados (a) e complexo (b) da coluna de pratos.

O uso dos modelos a priori, além auxiliar a melhorar a qualidade das imagens geradas, ajuda a contornar limitações da técnica como as que são impostas pelo ângulo relativo, objetos verticais e dados incompletos (Vengrinovich et al., 2013), que introduzem manchas, diminuem a nitidez de bordas e diminuem os valores dos μ s calculados, mostrados na Figura 45.

Figura 45 – Imagens de reconstrução direta (a); reconstrução com modelo a priori simplificado (b); e reconstrução com modelo a priori complexo (c).

3.3.7 Ângulo relativo e objetos verticais

O ângulo relativo é definido como o ângulo formado pela direção fonte-detector de radiação com relação a horizontal (Figura 46) e representa uma limitação prática da tecnologia de imageamento, pois quanto maior ele for maiores serão as espessuras e distâncias envolvidas. O ângulo relativo máximo é limitado pela estatística de contagem, a partir do qual não se obtém nenhum dado estatisticamente válido.

Figura 46 – Aumento da espessura em função do ângulo relativo (α).

A limitação do ângulo relativo e a própria geometria dos equipamentos de processo impede irradiações próximas da direção vertical. Com isso, a definição de bordas no sentido horizontal é muito mais deficiente em relação ao sentido vertical. Adicionalmente, objetos verticais como as paredes do vaso metálico não podem ser resolvidas pelo sistema e sua contribuição no processo de atenuação dos fótons fica

diluída na imagem, resultando em valores de “ μ ” maiores do que o esperado (Figura 47).

Figura 47 – Efeito do aumento do “ μ ” aparente pelo mascaramento de objetos delgados.

4 TRANSIÇÃO LABORATÓRIO CAMPO

A transição da tecnologia de imageamento da escala de laboratório para o uso em campo transcorreu de forma mais rápida e simples que o inicialmente previsto. Parte do mérito deve-se a experiência de 20 anos em escaneamentos de coluna, que permitiu filtrar rapidamente as propostas que funcionariam bem em campo daquelas que só criariam mais trabalho em campo, tendo em vistas as qualidades requeridas para um equipamento de campo como apresentado no item 2.3. Empregar uma tecnologia e equipamento já extensamente testado em campo foi uma decisão segura e acertada, pois eliminou a necessidade de desenvolvimento de itens não essenciais ao trabalho, restringindo esta parte final apenas aos experimentos e resultados de campo.

4.1 Ponto de partida

Para levar a técnica de imageamento em campo, como vimos nas seções anteriores, uma série de conhecimentos e experiência já estava desenvolvida a saber:

- Estimativa de atividade de fonte de radiação requerida, taxa e tempo de contagens e nível de saturação do detector;
- Calibração e ajuste do sistema de detecção específico para imageamento;
- Algoritmo de simulação, reconstrução de imagens e a priori; e
- Software para coleta de dados.

A definição da estratégia para o teste de campo viria após as considerações apresentadas nos itens 4.1.1 a 4.1.3.

4.1.1 Equipamentos de campo

O equipamento de laboratório conta com um sistema que alinha o colimador da fonte com o detector de radiação de forma mecânica, com grande simplicidade e precisão. Num equipamento de campo esse tipo de construção não é prático, de modo que alguns conceitos da construção mecânica do sistema foram elaborados. Na Figura 48 são mostradas as 3 (três) possibilidades de posicionamento do detector, com relação ao equipamento de processo:

- (a) Paralelo ao eixo vertical, tal como empregado nos trabalhos de escaneamento de coluna. Tem a vantagem de ser simples de movimentar e ter uma área de seção (sombra) pequena, o que facilita sua movimentação ao longo da coluna. Num escaneamento tradicional a geometria do cristal é constante, mas é variável na geometria de imageamento;
- (b) Perpendicular ao eixo vertical, tal como empregado no protótipo de laboratório. Tem uma grande sombra, que dificulta sua movimentação ao longo do equipamento. Para manter uma geometria constante é preciso que o sistema incorpore um sistema de rotação e alinhamento com relação a fonte que pode ser complexo, o que aumentaria ainda mais seu volume e sombra; e
- (c) Paralelo á parede do vaso. Tem uma sombra grande, mas tem geometria constante num sistema de imageamento e pode requerer algum tipo de sistema de alinhamento para manter-se paralelo em relação a parede do vaso.

Todos os 3 (três) sistemas são passíveis de automação, sendo que a alternativa (a) é a que resulta na implementação mais simples por envolver apenas 2 (dois) eixos (fonte e detector de radiação) e menor sombra. Na prática é um requisito bastante importante, já que a área de passagem dos instrumentos em campo é quase sempre limitada, o que facilita muito sua instalação e operação. Na Figura 20, observa-se como o acesso dos instrumentos pode ser restrito e a abertura de passagens para equipamentos maiores pode não ser uma alternativa fácil.

Adicionalmente, este é o arranjo que atualmente é empregado na maioria dos equipamentos de escaneamento, de forma que um sistema manual poderia ser implementado com poucas adaptações.

Figura 48 - Três possibilidades de posicionamento para a movimentação do detector de radiação, com suas respectivas sombras, no equipamento de processo.

4.1.2 Colimação eletrônica

Os detectores cintiladores são a opção mais prática, robusta e com melhor custo benefício para as aplicações de campo como o caso do escaneamento de colunas, a tomografia industrial e o imageamento de equipamentos de processo. Apesar de frágeis, não necessitam de condições especiais de uso. Com manuseio adequado já foram empregados entre -30°C aos 45°C de temperatura. Com boa densidade e variedade nos tamanhos comerciais permite registrar boas taxas de contagem com as fontes de radiação gama, normalmente empregadas na indústria.

Uma característica dos detectores cintiladores tem sido pouco explorada: a energia dos fótons registrados pode revelar indiretamente informações sobre sua direção (Hussein, 2013), apesar de que num cristal cintilador a emissão do fóton de luz após uma interação parcial ou total do raio gama, seguir direção aleatória antes de ser coletado pelo sistema ótico e transformado em pulso pelo sistema fotomultiplicador. Assim, definida uma energia de corte como vimos no item 3.3.5, num sistema com apenas uma fonte de radiação, não faz sentido colimar fortemente um sistema para que apenas os raios gama de uma direção sejam detectados, já que os pulsos de energia do fotopico só podem ter vindo da direção desta fonte. Da mesma forma, estes fótons de maior energia só podem ter vindo da região limitada

pelo ângulo de espalhamento correspondente. Esta é a essência da colimação eletrônica.

4.1.3 Fontes e detectores de radiação pontuais

A qualidade de um espectro de radiação visto por um detector depende de seu tamanho e está ligada ao caminho livre médio (Equação 11), e corresponde ao inverso do coeficiente de atenuação linear do meio absorvedor do detector. Ele indica qual a distância que um fóton leva, em média, para ser absorvido num detector. Para os detectores de Iodeto de Sódio [NaI(Tl)] empregados neste trabalho o valor é de cerca de 3,50 cm para o Cs-137 e 5,28 cm para o Co-60. Nota-se, então, porque um detector de 2 x 2 polegadas é muito eficiente para uma fonte de Cs-137 e bom para uma fonte de Co-60.

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (9)$$

Observe que esta eficiência de detecção depende da orientação em que o cristal se encontra ou se movimenta com relação à fonte radioativa, cujo arranjo é mostrado na Figura 48. O arranjo geométrico tem muita importância quando a distância entre a fonte e o detector tem dimensões da mesma ordem de grandeza do detector. Para distâncias muito maiores, como no caso das tecnologias aqui abordadas, pode se questionar se o comportamento não seria puntiforme, ou pouco dependente desse posicionamento.

Para verificar qual seria a influência da geometria de medição, quando empregado uma movimentação como a do escaneamento de colunas no imageamento (Figura 48a), realizou-se um experimento nas instalações da empresa Tricom Tecnologia aonde medições a diferentes ângulos foram tomadas de uma fonte radioativa de Co-60 com 0,5 mCi de atividade, dentro de seu container (blindagem), mostrado na Figura 49. Empregou-se a calibração e os ajustes para imageamento apresentados no item 3.3.5, com contagens de 60 s.

Figura 49 - Arranjo do posicionamento relativo entre fonte e detector de radiação.

Os resultados são apresentados na Figura 50, sendo que a posição de 270° corresponde ao detector na posição vertical, paralelo ao eixo da coluna. Nas regiões entre $202,5^\circ$ a 270° e 270° a 360° correspondem às posições aonde a fonte se localiza acima e abaixo do detector de radiação, respectivamente. Notou-se uma maior atenuação entre $202,5^\circ$ e 225° , provavelmente por conta da atenuação causada pelo corpo do detector. O perfil de atenuação entre $\pm 45^\circ$ é aproximadamente simétrico ao redor da posição vertical como esperado. Os resultados não foram normalizados com relação à espessura de parede do detector. A variação percentual das leituras em relação à posição vertical (270°) parece diminuir com a distância. A maior variação da leitura em $202,5^\circ$ graus está relacionado à interferência do corpo do detector na geometria de irradiação.

Figura 50 - Resultado das medições do arranjo da Figura 49.

Tabela 2 - Variação percentual das leituras em relação à posição vertical (270°).

Ângulo (°)	100 cm	150 cm
315	0,046	0,051
292,5	0,010	0,005
270	0,000	0,000
247,5	0,023	0,007
225	0,079	0,055

5 PATENTES

O trabalho de mestrado intitulado "Imageamento de Equipamentos de Processos Industriais pela Técnica de Perfilagem por Raios Gama" defendido em abril de 2013 resultou num pedido de patente junto ao INPI, sob o número BR 10 2012 024416-0.

Os conceitos elaborados neste trabalho de Doutorado resultaram num pedido de patente, do tipo modelo de utilidade, junto ao INPI, sob o número BR 10 2018 008275-2, na fase nacional da entrada no PCT.

6 RESULTADOS PRÁTICOS

6.1 Proposta de Teste

Para executar o imageamento optou-se por empregar os mesmos equipamentos do escaneamento convencional, por uma série de fatores:

- Tratam-se dos equipamentos extensamente empregados e testados nas mais adversas condições de trabalho de campo. Apesar da eficiência cair com o passar dos anos, requerendo calibração e normalização dos dados; os resultados têm precisão e repetibilidade. Necessita de pouca manutenção, com conjuntos operando por mais de 10 anos;
 - Com os equipamentos de escaneamento tradicional, o processo de montagem, operação e desmontagem está bem estabelecido e pode ser feito dentro de uma jornada de trabalho normal;
 - Exceto o novo detector de NaI(Tl), os demais equipamentos estão em grande parte amortizados. Assim, o custo de conversão para a nova tecnologia é muito baixo;
 - No imageamento, adaptou-se um par de suportes para fonte e detector de radiação, de modo que um ângulo relativo de pelo menos 45° pudesse ser empregado. O suporte da fonte de radiação foi feito com tubos e tampas de PVC, mantido na vertical por um contrapeso em chumbo. No detector, empregou-se um suporte convencional de detectores de 2 pol. com um espaçador de 50 mm para manter o detector distanciado de seu contrapeso em chumbo, como pode ser observado na Figura 51;
 - O uso de um sistema não colimado apoia-se no emprego da colimação eletrônica, o que torna o conjunto fonte-detector de radiação muito simples, leve e robusto;
 - Ainda que a geometria do cristal mude com o ângulo relativo, a maior distância e espessura relativa das paredes do vaso metálico da coluna parecem ter maiores influências sobre os dados obtidos, de modo que
-

normalizações relativas à orientação do cristal quando aplicadas tiveram efeito insignificante;

- Empregou-se o mesmo conjunto de contêineres (blindagens), fontes e porta fontes de radiação, de modo que o custo de desenvolvimento foi nulo;
- Utilizou-se o mesmo programa, adotando apenas uma rotina diferenciada para a aquisição dos dados de imageamento que seguem um roteiro próprio; e
- As imagens reconstruídas foram obtidas por meio do algoritmo de ART, aplicando diversos filtros e comparando os resultados com as imagens obtidas por simulação.

Figura 51 - Croquis dos suportes de fonte e detector de radiação adaptados.

6.2 Primeiro imageamento feito na indústria

Realizou-se o primeiro imageamento de uma coluna de destilação real em um separador ou *stripper* de água, localizada numa indústria petroquímica no sul do Brasil. A coluna tem 1.300 mm de diâmetro interno, paredes com 9,5 mm de espessura e está equipada com 10 pratos do tipo *ripple* ou *dual flow*. Este tipo de prato ocupa toda a área transversal da coluna, não apresentam vertedores e tem um perfil em forma de onda (*ripples*) aonde o vapor ascende através de perfurações em

sua parte superior e o líquido desce por perfurações em sua parte inferior, mostrado na Figura 52.

Esta coluna sempre operou com limitações operacionais e dificuldades em atingir as especificações e capacidades de projeto. Diversos escaneamentos tradicionais ao longo dos anos não puderam identificar nenhum problema específico.

Figura 52 - Funcionamento esquemático de um prato tipo *ripple*.

Apenas a seção superior da coluna contendo um distribuidor de líquido de diâmetro nominal de 8 pol. e 6 pratos foi escaneada empregando uma fonte de 6 mCi de Co-60 e um detector cintilador de NaI(Tl), com 2×2 polegadas de diâmetro, espaçamento de 10 cm entre posições consecutivas da fonte e do detector de radiação, resultando em 908 tomadas de dados coletados em 2 horas, aproximadamente. Um *layout* simples da coluna e os croquis dos posicionamentos podem ser vistos na Figura 53. Os instrumentos movimentaram-se verticalmente, de cima para baixo, aproveitando a gravidade e posicionaram-se conforme o mapa na Figura 54.

Cada serie de dados foi tomada, mantendo a fonte de radiação fixa em uma elevação e movendo-se o detector nas elevações estabelecidas. Em seguida, moveu-se a fonte com o detector de radiação em 10 cm, sendo levada a sua posição inicial, começando uma nova tomada de dados; e assim sucessivamente. Os posicionamentos foram definidos ao limitar o ângulo relativo máximo em cerca de 45° , de modo que em cada serie de dados a diferença de elevação máxima seja de 150 cm para cima ou para baixo da posição da fonte de radiação.

O tempo total do trabalho de campo foi de 3 horas, aproximadamente, incluindo planejamento do trabalho, acesso da equipe aos equipamentos e materiais, montagem e desmontagem, e tomada dos dados.

Figura 53 - Croquis da coluna de separação e geometria do imageamento (mm).

Figura 54 - Mapa de posicionamentos da fonte e do detector de radiação.

Os escaneamentos cruzaram diagonalmente o distribuidor de líquido do tipo espinha de peixe, localizado no topo da coluna. O croqui da orientação empregada pode ser observado na Figura 55.

Figura 55 - Orientação do escaneamento no distribuidor de líquido, no topo da coluna.

Assim como num escaneamento convencional, os resultados de um imageamento podem ser afetados por estruturas fixas na coluna como anéis de reforço, bocais de instrumentos e processo, bocas de visita, plataformas e suportes, sendo que a melhor estratégia de posicionamento, então, é escolher o caminho com a menor quantidade possível de interferências. Todavia, se isto não puder ser evitado, a dimensão extra provida pela técnica de tomografia permite identificar esta interferência na imagem resultante. Os requisitos de acesso e instalação dos equipamentos são os mesmos do escaneamento de colunas tradicional, de forma que qualquer coluna que já foi escaneada antes pode ser analisada também, por meio da tecnologia de imageamento.

Um escaneamento convencional foi efetuado na coluna imediatamente antes da realização do imageamento e como a coluna já havia sido escaneada em outras oportunidades, os resultados podem ser apresentados sobrepostos (Figura 56b). O imageamento seguiu a mesma orientação dos escaneamentos convencionais para que os resultados fossem diretamente comparáveis. Não havia nenhum elemento externo que pudesse interferir na tomada de dados como bocas de visita, plataformas, anéis e bocais. Um sistema de colimação mecânico, como o empregado no protótipo de laboratório não é prático em campo, tendo em vista as dificuldades de transporte, montagem e movimento.

6.2.1 Resultados

Na Figura 56a é mostrado o resultado do imageamento realizado, o qual é consistente com os escaneamentos tradicionais observados na Figura 56b. A

análise da imagem deve levar em conta qual o resultado esperado para cada parte da coluna em função do seu funcionamento hidráulico e operação, se contem ou não líquido, vapor ou líquido aerado, ou a interferência de alguma parte mecânica. Qualquer desvio desse perfil ideal pode estar relacionado com algum problema mecânico, de processo ou operacional.

Os resultados da análise podem ser dispostos assim:

- O distribuidor de líquido está em sua correta elevação, nivelado e com líquido. Os escaneamentos cruzaram-no diagonalmente, logo, deve-se observar um perfil simétrico na correspondente elevação indicando que o tubo central e os laterais estão nos lugares corretos. A dimensão da imagem (Figura 57) corresponde ao diâmetro externo (219 mm) de um tubo de 8 pol. normalmente empregado nestes equipamentos;
- Uma área de baixa densidade (vapor) pode ser vista logo acima do distribuidor, indicando que não há arraste de líquido para o topo da coluna. Arraste é o fenômeno de processo aonde gotículas de líquido são carregadas pelo fluxo de vapor ascendente para o topo da coluna, que seria na imagem como uma região com densidade maior que o normal (vapor). Quando operando normalmente, nenhum sinal de arraste pode ser visto no alto da coluna;
- As bandejas de 1 a 5 podem ser vistas em suas devidas elevações, com o líquido nivelado e com, em média, 10 a 15 cm líquido (Figura 57) em cada bandeja, coincidindo bastante com os valores anotados no escaneamento tradicional. Não há indicações de zonas de maior densidade sobre os pratos que revelaria sinais de arraste, inundamento ou outro fenômeno de processo anormal; e
- Os resultados dos escaneamentos convencionais e do imageamento mostram os pratos pares parecendo mais densos que os ímpares. Isto pode ser explicado pela montagem dos pratos do tipo *ripple*, que são alternadamente dispostos com 90° de rotação. Assim, nos pratos pares os raios gama atravessaram a chapa de metal diversas vezes e nos pratos ímpares atravessaram praticamente apenas líquido aerado.

Figura 56 - Imageamento de uma coluna de destilação industrial (sem dados a priori) (a) e o correspondente escaneamento convencional (b). Fonte: Tricom Tecnologia.

O resultado do imageamento parece indicar um problema que nunca havia sido notado através dos escaneamentos tradicionais feitos na coluna: as bandejas aparentam estarem menos densas em sua região central. Má distribuição de líquido nas bandejas podem ser a causa do fenômeno observado, um problema que pode ocorrer em bandejas deste tipo e que nunca havia sido documentado em colunas reais, sendo que problemas de má distribuição concêntrica são muito difíceis de serem observados, por meio da técnica de escaneamento de colunas.

Figura 57 - Alturas aproximadas de líquido aerado e dimensão do distribuidor.

As imagens geradas por meio da técnica de imageamento podem ser melhoradas com o uso das distribuições de densidade a priori, como ponto de partida para o processo de reconstrução. Esta distribuição pode ser obtida conhecendo-se detalhes dos internos das colunas, seu processo e forma de operação. Nas Figura 58a e b são mostrados, respectivamente, uma distribuição de densidade a priori e a imagem do imageamento reconstruída com esta técnica. Note que as paredes do vaso passam a ser perfeitamente visíveis e o indício de má distribuição de líquido sobre os pratos fica ainda mais evidente.

Figura 58 - Modelo de distribuição a priori da coluna (a) e reconstrução do equipamento real usando o conhecimento a priori (b).

O imageamento de uma coluna pode ser simulado para testar hipóteses, verificando se um determinado modelo de distribuição converge com o resultado obtido experimentalmente. Desta forma, a resposta para condições normais e situações anormais que passíveis de ocorrer na coluna podem ser comparadas com os resultados experimentais e uma melhor avaliação da imagem reconstruída pode ser feita. Para o imageamento da coluna com pratos do tipo *ripple*, elaboraram-se 3 (três) modelos da coluna para simulação: pratos normais (Figura 59a); pratos inundados (Figura 59b); e pratos danificados (Figura 59c). As imagens obtidas na Figura 59 não empregaram nenhuma resposta a priori. A imagem resultante para os pratos em operação normal é muito similar ao obtido experimentalmente e não mostra nenhum sinal de má distribuição concêntrica. Os outros 2 (dois) problemas resultam em imagens bastante distintas da imagem reconstruída de modo que qualquer problema similar seria facilmente visualizado.

Figura 59 - Distribuição esperada de densidades em funcionamento normal e sua reconstrução (a); distribuição de densidades e reconstrução de pratos inundados (b); e distribuição de densidades de pratos danificados (c).

6.3 Segundo imageamento

Na técnica de escaneamento tradicional os dados são interpretados comparando o perfil de densidade obtido com aquele que seria esperado pela absorção da radiação pelo processo industrial, internos e outras partes constituintes da coluna; sabendo-se que boa parte desta atenuação é causada pelo líquido em seu interior. Internos que não sustentam muito líquido, tais como demisteres e chicanas; equipamentos com baixa vazão de líquido; equipamentos novos ou com desenho incomum são difíceis de analisar com a técnica tradicional, porque seu perfil de densidade não pode ser facilmente relacionado com algum problema ou condição operacional. O equipamento industrial (desaerador), no qual se realizou a segunda experiência com a técnica de imageamento encaixa-se exatamente nesta descrição.

6.3.1 Desaerador

Um desaerador é um equipamento de processo que objetiva retirar gases não condensáveis como oxigênio e gás carbônico da água de uso industrial, empregando o princípio físico da redução da solubilidade de um gás num líquido pela redução de sua pressão parcial e aumento de temperatura (Lei de Henry). Um desaerador do tipo pulverizador, como o inspecionado, coloca um *spray* de líquido em contato com uma corrente contrária de vapor de água (Figura 60).

Figura 60 - Croqui do desaerador do tipo pulverizador avaliado.

Um desaerador com 2.400 mm de diâmetro interno, 4.130 mm de altura entre tangentes, com paredes de 13 mm de espessura, localizado em uma planta química, experimentava problemas de desempenho com uma quantidade excessiva de água sendo arrastada pelo bocal de ventilação, levantando suspeitas de que algum tipo de problema mecânico ou inundação ocorresse em seus internos. Uma série de escaneamentos tradicionais orientados e mostrados na Figura 61^a foram executados com o intuito de esclarecer os problemas apresentados.

Nos escaneamentos empregaram-se 1 (uma) fonte de Co-60, com 9,54mCi de atividade e 1 (um) detector de NaI(Tl) de 2×2 polegadas de diâmetro, tomando dados a cada 5 cm de espaçamento. Os resultados destes escaneamentos não indicaram sinais de inundamento ou arraste, nem de danos mecânicos óbvios. O gráfico indica que a altura do conjunto de chicanas não coincide exatamente com a indicação de desenho e que os 4 (quatro) perfis de densidade tomados em cordas

equidistantes não são coincidentes, o que normalmente indica algum problema mecânico ou de distribuição de líquido que a técnica não permite determinar exatamente qual. O quinto escaneamento adicional foi orientado de modo a cruzar o centro do vaso, mas não revelou nenhuma outra informação adicional. Com estes resultados pouco pode ser inferido sobre o mau funcionamento do desaerador.

Figura 61 - Orientações (a) e gráficos de escaneamento convencional (b) obtidos.

Alterando apenas o ajuste do equipamento de medição e substituindo os colimadores empregados na fonte e no detector de radiação, o equipamento de escaneamento foi rapidamente adaptado para realizar uma inspeção por imageamento.

O imageamento foi efetuado ao longo de 5.200 mm de altura, iniciando-se 300 mm acima da linha de tangente superior do vaso e terminando 770 mm abaixo de sua linha de tangente inferior, de modo que praticamente toda sua região cilíndrica fosse escaneada (Figura 62). Os dados foram colhidos em espaçamentos de 10 cm para posições consecutivas da fonte e do detector de radiação, com tempo de amostragem de 2 s. Na Figura 63 é mostrada como foram colhidas as 35 series de dados que resultaram em 1.371 pontos, tomados em 3,5 horas de trabalho, aproximadamente. O ângulo relativo foi limitado em cerca de 45 graus e nem todas as series de dados na região inferior do vaso foram tomadas, já que esta região

estava vazia. A tomografia foi efetuada na mesma corda da posição norte (linha vermelha) para permitir uma comparação direta.

Figura 62 - Geometria de imageamento empregada.

Figura 63 - Mapa de posicionamentos da fonte e do detector de radiação.

6.3.2 Resultados

Os resultados do imageamento do desaerador coincidem com aqueles do escaneamento da região norte, mas revela detalhes que não podem ser observados com a técnica tradicional (Figura 64):

- Aparentemente, há algum tipo de obstrução ou objeto plano sobre o conjunto de chicanas que bloqueia a passagem de líquido na região;
- Ambas as inspeções não conseguiram apontar a origem do arraste de líquido pelo topo do desaerador, embora o vazio encontrado pelo imageamento no topo leve a suspeição de que o arraste esteja relacionado com isso de alguma forma; e
- A empresa proprietária do desaerador decidiu conviver com o problema até que a oportunidade de uma intervenção no equipamento apareça.

6.3.3 Estudos adicionais

Além da reconstrução da imagem propriamente dita, este segundo experimento em campo serviu como prova da técnica de a priori e também para estudar o efeito do passo na coleta de dados na qualidade de imagem, e tempo de execução da inspeção.

6.3.3.1 A priori

Elaborou-se um modelo a priori do desaerador, mas não resultou em melhoria significativa como pode ser observado nas imagens da Figura 65.

Figura 65 - Uso do aprimoramento de imagem com a priori. Imagem inicial (a); modelo a priori (b); e imagem resultante (c).

6.3.3.2 Influência do passo

Idealmente, quanto menor o passo empregado no escaneamento, mais fina será a qualidade da imagem reconstruída. Todavia, como o tempo de trabalho em campo é limitado, deve procurar um balanço entre a qualidade da imagem e a quantidade de dados tomados em campo. Pesam ainda fatores como região de interesse e nível de detalhamento requerido para a imagem gerada. Ao definir o tempo estimado do teste, fatores como atividade da fonte, área de isolamento e dose estimada do pessoal envolvido são diretamente influenciados. Além disso, um tempo menor de teste, significa que o equipamento também precisa permanecer estável por um período de tempo menor também, o que abre a possibilidade de inspecioná-los sob condições operacionais mais exigentes ou até mesmo durante transientes.

Uma proposta para determinar o passo a empregar consiste em relacioná-lo com a distância fonte-detector de radiação, tempo de teste e qualidade da imagem obtida. Numa segunda análise dos dados do imageamento do desaerador, imagens

foram reconstruídas usando apenas parte dos dados originais, como se tivessem sido obtidos com espaçamentos maiores.

A Figura 66 e a Tabela 3 indicam que apesar de haver perdas na qualidade da imagem, o aumento do passo permite obter um ganho significativo no tempo de execução do teste.

Figura 66 - Imagens reconstruídas ao simular diferentes passos na tomada de dados.

Tabela 3 - Relação passo com quantidade de pontos e tempo de execução.

Passo (cm)	10	20	30	40
Relação com distancia fonte-detector de radiação (%)	4	8	12	16
Quantidade de pontos	1371	353	157	89
Tempo teste (min.)	210	54 (estimado)	24 (estimado)	14 (estimado)
Ganho de tempo (%)	-	75	89	93

Note que as principais feições observadas na imagem de melhor qualidade podem ser vistas em todas as outras imagens, ainda que com alguma perda de fidelidade:

- Região de menor densidade no centro da calota superior;
- Ausência de inundamento e arraste acima do pacote de bandejas;
- Presença do pacote de bandejas;
- Formato irregular do pacote de bandejas;
- Má distribuição de densidades no pacote de bandejas; e
- Vapor na região de fundo.

Com isto em mente é razoável supor que, estando à reconstrução de imagens disponível em campo, escaneamentos com maior passo podem ser empregados para visualizar o resultado geral, até em diferentes seções do equipamento, com escaneamentos subsequentes focados apenas nas regiões de maior interesse, aumentando-se gradativamente a qualidade da imagem em locais específicos da imagem.

6.3.3.3 Sistema multidetectores de radiação

Ao empregar apenas um detector de radiação, despendeu-se um tempo de amostragem de cerca de algumas horas, que pode ser considerado adequado em face ao tempo disponível para a realização de um ensaio convencional que é de 8 a 10 horas. No entanto, como descrito no item 6.3.3.2, há situações em que se deseja obter as informações da maneira mais rápida ou com o menor distúrbio na planta possível. Outra forma de diminuir o tempo de amostragem é empregando mais de um detector de radiação. Desta forma pode se obter uma boa imagem com um tempo de escaneamento pequeno.

Na Figura 67 é mostrada a imagem reconstruída, que seria obtida se empregados passo de 50 cm no detector e 10 cm na fonte de radiação resultando, num sistema com apenas um detector, em 281 pontos tomados em estimados 43 minutos de escaneamento. No entanto, se houvesse um sistema com 10 detectores espaçados também a cada 50 cm, os dados poderiam ser tomados com apenas uma movimentação da fonte em cerca de 8 minutos de escaneamento, ou seja, 6% do tempo original.

Figura 67 - Imagem reconstruída a partir de um passo de 50 cm no detector e 10 cm na fonte de radiação.

6.4 Apresentações da tecnologia de imageamento

A tecnologia de imageamento tem despertado grande interesse no setor, pois existem poucas soluções que permitem visualizar e entender melhor o comportamento de equipamentos industriais. Existem alguns fóruns técnicos especializados no assunto, que envolvem desde grandes empresas operadoras dos equipamentos de processo como as indústrias de petróleo e petroquímica, como as empresas fornecedoras de tecnologia e projeto básico, passando pelos fabricantes de equipamentos e empresas especializadas em diagnóstico, pesquisa e consultoria. Até o presente momento, apresentações desse projeto de pesquisa já foram realizadas nos EUA:

- *2016 Spring Meeting and 12th Global Congress on Process Safety*, 10 a 14 de Abril, Houston, EUA; e
- *2018 Spring Meeting and 14th Global Congress on Process Safety*, 22 a 26 de Abril, Orlando, EUA.

Está previsto para apresentação na Europa:

- *11th International Conference on Distillation & Absorption*, 16 a 19 Setembro de 2018, Florença, Itália.

7 PONTOS A DESENVOLVER

A partir deste ponto a pesquisa, há necessidade da pesquisa e o desenvolvimento em algumas frentes:

- **Trabalhos práticos de campo** - Verificar as dificuldades, possibilidades, vantagens e desvantagens na inspeção de equipamentos já anteriormente escaneados pela técnica tradicional, notadamente equipamentos de maior porte e colunas equipadas com recheio. Aplicar a tecnologia em outros tipos de equipamentos, desde aqueles que não eram usualmente inspecionados por alguma limitação da técnica antiga, como outros equipamentos, cuja inspeção fica agora possível com a nova técnica;
 - **Aprimoramento da técnica** - As próximas etapas do desenvolvimento devem incluir a pesquisa com sistemas multidetectores de radiação, visando tanto o ganho de tempo na coleta de dados, como também a possibilidade de escaneamentos em múltiplos planos e, a partir deste ponto, na reconstrução tridimensional do perfil de densidades;
 - **Sistemas auxiliares** - A movimentação de equipamentos, comunicação ou softwares, receberão modificações para se tornarem mais práticos em campo; e
 - **Integração** - Apesar do sucesso da aplicação da técnica em campo, ela ainda não é comercial, pois seus diversos sistemas precisam ser integrados como de um produto pronto para comercialização ou licenciamento.
-

8 CONSIDERAÇÕES

A transição de uma nova tecnologia do laboratório para o campo pode apresentar grandes dificuldades, já que muitas vezes os requisitos necessários para cada uma destas etapas são conflitantes. Muitas vezes, essa adaptação torna projetos simples em sistemas complexos, aonde até o conceito original pode ser perdido. Limitações da tecnologia à época do desenvolvimento podem impor conceitos e padrões difíceis de serem dissociados da técnica com o passar do tempo.

A indústria e a ciência pecam por se isolarem em seus extremos sem estabelecer uma comunicação. A primeira valoriza demais o imediatismo; a segunda por apegar-se demais à repetição, a aquilo que já foi estabelecido. Condições sociais pesam igualmente, pois a inovação, apesar de se beneficiar muito da fartura, da riqueza de recursos; se inspira, por outro lado, muito da carência, não apenas da falta de soluções, mas também da limitação de recursos materiais.

Este é o cenário no qual foi desenvolvido este projeto, ou seja, da necessidade do aprimoramento de uma técnica e de toda uma indústria, da carência de informações e recursos, da necessidade de entender apropriadamente uma tecnologia, do questionamento dos padrões estabelecidos e da compreensão dos 2 (dois) extremos envolvidos no desenvolvimento de uma tecnologia. Em outras condições, talvez este projeto não tivesse existido.

9 CONCLUSÃO

A proposta desta Tese foi atingida com sucesso. A implementação prática da nova tecnologia além de simples é eficiente ao empregar os mesmos equipamentos atualmente utilizados necessitando de poucos recursos para sua conversão. Os resultados vêm revelando informações que não podia ser visualizadas até então, despertando grande interesse de todo um segmento como pode ser observado nas apresentações feitas nos fóruns internacionais específicos da área de destilação. Adicionalmente, mais do que desenvolver uma nova tecnologia e metodologia, esta tese apresentou um novo conceito para a medição da radiação que atravessa um meio que mostra grande potencial de desenvolvimento de inspeções que equipamentos industriais.

10 BIBLIOGRAFIA

BUSCIGLIO A., OPLETAL M., MOUCHA T., MONTANTE G., PAGLIANTI A., 2017, Measurement of gas hold-up distribution in stirred vessels equipped with pitched blade turbines by means of electrical resistance tomography, Chemical Engineering Transactions, 57, 1273-1278 DOI: 10.3303/CET1757213

CHARLTON J. S., 1986, Radioisotope Techniques for Problem Solving in Industrial Process Plants, Gulf Publishing Company, Houston, USA.

HARAGUCHI, M. I.; KIM, H. Y.; MACHADO, R. O. Tomografia industrial computadorizada. In: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 22-25 de junho, 2010, Santos, SP.

HUSSEIN, E. M. A., Handbook on Radiation Probing, Gauging, Imaging and Analysis, Vol. 2, 2003, pag. 678, Kluwer Academic Publishers, Dordrechr, Holanda, ISBN 1-4020-1295-0.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2008, IAEA-Tecd-1589 - Industrial Process Gamma Tomography. Final report of a coordinated research project (2003-2007). 3rd October, ISBN 978-92-0-104508-9.

KALAGA, D.V., KULKARNI, A.V., ACHARYA, R., KUMAR, U., SINGH, G., JOSHI, J.B., Some industrial applications of gamma-ray tomography, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 40, (2009) 602–612.

KIM H. Y., HARAGUCHI M. I., CALVO W. A. P., 2016, Comparison of Industrial Tomography Algorithms for Gamma Scanning 2-D Reconstruction, WC IPT8 - 8th World Congress on Industrial Process Tomography, Iguaçu Falls, Brazil, ISBN: 978 0 853 16349 7

KIM, J., JUNG, S., MOON, J., CHO, G., Industrial gamma-ray tomographic scan method for large scale industrial plants. NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH A, 640 (2011) p 139-150, 2011.

KISTER H. Z., WINFIELD C., 2016, What Process Troubleshooters Should Know about Downcomer Gamma Scans, Presented at Distillation Topical Conference AIChE Spring Meeting, April 10-14, Houston, USA.

OLIVEIRA, E. F.; MELO, S. B.; DANTAS, C. C.; VASCONCELOS, D. A. A.; CADIZ, L. F. Comparison among tomographic reconstruction algorithms with a limited data. INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE (INAC-2011), 24-28 de outubro, 2011, Belo Horizonte, MG. Proceedings, ISBN: 978-85-99141-04-5.

OUTILI N., CHEGGA N., ELBAHI K., MENIAI A.H., 2013, Effect of Downcomers Sizes on Tray Column Performance, Chemical Engineering Transactions, 32, 1981-1986, DOI:10.3303/CET1332331

PAN, X., SIDKY E.Y., VANNIER M., Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction? Inverse Probl. 25 (12), (2009) 123009.

PLESS L. T., 2014, Distillation Tower Gamma Scanning – Now a Quantitative Tool for Measuring Useful Capacity, 10th International Conference on Distillation & Absorption 2014, Friedrichshafen, Germany, 988-994.

SANCHES, MATHIAS. P.; HARAGUCHI, MARCIO. I.; BECKMANN, FRANCIS.S.; CALVO, WILSON. A. P. Radiological safety in the gamma scan procedures. INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE (INAC-2007), 30 de Setembro – 5 de Outubro, 2007, Santos, SP. Proceedings of INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, Santos : ABEN, 2007.

SEVERANCE W. A. N., 1981, Advances In Radiation Scanning of Distillation Columns, Chemical Engineering Progress 77(9):38-41

SPEAR, M. Gamma scanning seeks an inside edge, 2007, disponível em: <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2007/088/>. Acesso: 17/04/2018.

SPIEGEL, L., MEIER, W., 2003, Distillation Columns with Structured Packings in the Next Decade, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 81(1), 39-47, DOI10.1205/026387603321158177.

TRACERCO. RapidScan System. Disponível em:
<https://www.tracerco.com/pdfs-uploaded/US%20RapidScan%20Datasheet.pdf>.
Acesso: 17/04/2018.

TRACERCO, Discovery™ for Subsea Pipelines, Disponível em:<https://www.tracerco.com/subsea/discovery/home>, Acesso: 17/04/2018.

URBANSKI N. F., RESETARITS M. R., SHAKUR M. S. M., MONKELBAAN D. R., BUCIOR D. A., 1999, Gamma Scanning a Column Containing Closely Spaced Trays, Annual Meeting AIChE 1999, T1007c, Dallas, USA.

VENGRINOVICH, V., ZOLOTAREV, S., A Priori Information As A Key To Extend X-Ray Tomography From Incomplete Data, 2013, 7th World Congress on Industrial Process Tomography, WCIPT7, 2-5 September 2013, Krakow, Poland.

WOLSCHLAG L. M., COUCH K. A., 2010, Upgrade FCC Performance, Hydrocarbon Processing, September 2010, 57-65, Gulf Publishing Company, USA.

XU, S. X., Quantitatively measure and assess misdistribution in industrial packed towers. In: CE EXPO'2000, 7-8 June, 2000.

XU, S. X., KENNEDY G., 1999, Gamma-Ray Computer-Aided Tomography of Industrial Packed Columns, AIChE 1999 Spring National Meeting, Houston, USA.

ANEXO I – Artigo Publicado Flow Measurement and Instrumentation

ARTICLE IN PRESS

Flow Measurement and Instrumentation xxx (xxxx) xxx–xxx

Contents lists available at ScienceDirect

Flow Measurement and Instrumentation

journal homepage: www.elsevier.com/locate/flowmeasinst

Tomographic 2-D gamma scanning for industrial process troubleshooting

Marcio Issamu Haraguchi^a, Wilson Aparecido Parejo Calvo^b, Hae Yong Kim^{c,*}^a Tricom Tecnologia, Av. Conselheiro Rodrigues Alves, 58, Piquete, Brazil^b Nuclear and Energy Research Institute – IPEN/CNEN-SP, Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 São Paulo, SP, Brazil^c Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Av. Prof. Luciano Gualberto, tr. 3, 158 São Paulo, SP, Brazil

ANEXO II – Pedido de Patente no INPI

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2018 008275 2

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: MARCIO ISSAMU HARAGUCHI

Tipo de Pessoa: Pessoa Física

CPF/CNPJ: 11625669810

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Outras ocupações não especificadas anteriormente

Endereço: Rua Bartolomeu de Ribeira 93 Jaguaré

Cidade: São Paulo

Estado: SP

CEP: 05331-030

País: Brasil

Telefone:

Fax:

Email: mail@dannemann.com.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): SISTEMA E PROCESSO DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Resumo: Descreve-se um sistema e o processo de imageamento de equipamentos industriais utilizando das técnicas de perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica de imagens, em que (a) um subsistema de emissão de radiação com pelo menos uma fonte de radiação emite radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento; (b) um subsistema de detecção de radiação com pelo menos um detector de radiação detecta a energia da radiação emitida pelo subsistema de emissão de radiação que atravessou o referido equipamento industrial; (c) meios de processamento e imageamento recebem e avaliam as amostras de radiação detectadas pelo subsistema de detecção de radiação e geram um tomograma da região analisada, selecionando as amostras de radiação detectadas com valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e gerando uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base nessas amostras de radiação selecionadas.

Figura a publicar: 1

Dados do Procurador

Procurador:

Nome ou Razão Social: Carlos Cezar Cordeiro Pires

Numero OAB:

Numero API: 282

CPF/CNPJ: 75203014787

Endereço: Rua Marquês de Olinda, nº 70 - Botafogo

Cidade: Rio de Janeiro

Estado: RJ

CEP: 22251-040

Telefone: (21) 2237-8700

Fax: (21) 2553-1812

Email: cpires@dannemann.com.br

Escritório:

Nome ou Razão Social: Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira

CPF/CNPJ: 33163049000114

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 1

Nome: MARCIO ISSAMU HARAGUCHI

CPF: 11625669810

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Outras ocupações não especificadas anteriormente

Endereço: Rua Bartolomeu de Ribeira 93 Jaguaré

Cidade: São Paulo

Estado: SP

CEP: 05331-030

País: BRASIL

Telefone:

Fax:

Email:

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Relatório Descritivo	RELATÓRIO P234240.PDF
Reivindicação	REIVINDICAÇÃO P234240.PDF
Resumo	RESUMO P234240.PDF
Desenho	P234240 figuras.PDF
Procuração	39075366_1.pdf
Comprovante de pagamento de GRU 200	GUIA P234240 200 04-24-2018 1632716.PDF
SUBSTABELECIMENTO	SUBSTABELECIMENTO-2018.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- ☒ Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- ☒ Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.

Relatório Descritivo da Patente de invenção para "**SISTEMA E PROCESSO DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**".

[001] A presente invenção se refere em geral à inspeção de equipamentos industriais por meio de imagens, em particular, a um sistema de medição e geração de imagens do perfil de densidades de equipamentos industriais pela combinação das técnicas de perfilagem por raios gama e reconstrução tomográfica. A presente invenção é aplicável em diversos setores da indústria que utilizem equipamentos de processo tais como colunas, colunas ascendentes ("risers"), reatores de leito fixo e fluidizado, trocadores de calor, vasos separadores e tubulações, visando identificar fenômenos que possam causar problemas mecânicos, operacionais ou de processo que influenciem no seu bom funcionamento.

DESCRIÇÃO DO ESTADO DA TÉCNICA

[002] Nas plantas de produção contínua, tais como, em refinarias e petroquímicas, o desempenho dos equipamentos de processo é analisado com o auxílio de um modelo de processo, em função das suas variáveis operacionais, da qualidade dos insumos e produtos. Com o advento dos processos, projetos e das operações cada vez mais complexas e com limites restritos, as tecnologias de ensaios não destrutivos têm sido empregadas para se validar, verificar ou diagnosticar em tempo real (on-line) o modelo de processo.

[003] Dentre as tecnologias atualmente disponíveis, as técnicas nucleares destacam-se por não interferir ou alterar o processo em análise, permitindo que sejam feitas avaliações e diagnósticos em tempo real. Técnicas como a perfilagem de colunas por raios gama, retro-espalhamento de nêutrons, traçadores químicos e radioativos e a tomografia industrial computadorizada, tornam-se práticas cada vez mais comuns e representam as mais poderosas ferramentas para

análise dos equipamentos de processo em operação.

[004] Dentre estas técnicas, a de perfilagem por raios gama (gamma scan) consolidou-se como uma das melhores opções no diagnóstico mecânico operacional destes equipamentos. Nesta técnica, uma fonte radioativa selada e um detector de radiação são posicionados diametralmente opostos ao redor do equipamento e movimentados simultaneamente ao longo de seu comprimento. Os valores de atenuação da radiação que atravessa o equipamento permite que seja obtido um perfil de densidades longitudinal do equipamento. Em seguida, o perfil de densidades unidimensional (1D) ou gráfico de escaneamento é analisado, para elaboração do relatório técnico de ensaio.

[005] Apesar de se basear em princípios simples, sua aplicação mostra-se complexa em função do vasto conhecimento específico requerido em suas diversas fases, tanto para operar o equipamento, como para interpretar os resultados obtidos. Em geral, um especialista em gamma scan deve dominar temas como: avaliações preliminares (mecânicas e de processo), trabalhos em campo, proteção radiológica, experiência prévia, interpretação de dados, redação e habilidades interpessoais. Esta barreira demonstrou-se também um impedimento para a maior divulgação e aceitação da técnica pelo mercado, visto que o cliente final na indústria também deve ter um bom domínio da técnica.

PARTICULARIDADES DO GAMMA SCAN

[006] É importante entender alguns conceitos básicos a técnica de perfilagem por raios gama, que envolvem limitações que restringem seu uso a algumas aplicações:

- Taxa de contagem – como o tempo disponível para testes de campo é limitado, o gamma scan limita-se a casos onde é possível medir valores de contagem estatisticamente válidos;
- Densidade média – cada ponto obtido numa perfilagem

relaciona-se à densidade média do caminho percorrido pelo feixe de radiação ionizante;

- Posicionamento – a interpretação de dados de posicionamento só é possível quando as características do objeto em estudo forem aproximadamente uniformes ao longo do equipamento sendo inspecionado; e

- Dimensão – a perfilagem por raios gama oferece apenas uma visão unidimensional.

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

[007] Tomografia refere-se a adquirir imagem por seções ou fatias, pelo uso de qualquer onda penetrante. O método é usado em radiologia, arqueologia, biologia, geofísica, oceanografia, ciências dos materiais, astrofísica e outras ciências. A tomografia está baseada em algoritmos matemáticos chamados de reconstrução tomográfica.

PRINCÍPIOS FÍSICOS

[008] Os tomógrafos convencionais funcionam por meio do princípio da atenuação da radiação denominada “I”, a partir da radiação inicial “I₀”, que pode ser analiticamente expressa pela lei de Beer-Lambert, na equação 1:

$$I = I_0 \cdot f(\mu, x) \quad (1)$$

[009] na qual “μ” é o coeficiente de atenuação linear do meio para uma determinada energia e “x” é a espessura do objeto.

[0010] Se esta propriedade física varia ao longo de um caminho dentro do objeto, pode-se representar a função como um produto de funções. Usando reconstrução tomográfica, obtém-se a distribuição desta propriedade dentro de uma região em análise, com um número limitado de medidas. No processo de reconstrução em uma tomografia, as contagens são uma função do coeficiente de atenuação linear (μ) e do caminho percorrido dado por

$$C_i = g(\mu, x, y)$$

[0011] e a distribuição espacial da propriedade “ μ ” é dada pela função

$$\mu = f(x,y)$$

TOMOGRAFIA CONVENCIONAL – FUNCIONAMENTO BÁSICO

[0012] Em princípio, desde que sejam conhecidos os pontos de emissão e recepção de sinais, uma imagem tomográfica pode ser obtida de qualquer tipo de arranjo espacial. Em muitos casos, a própria constituição do sistema de medição impõe uma geometria ou parte-se de uma geometria conhecida por facilidade de implementação de uma rotina de tratamento de dados.

[0013] Diversas configurações de equipamento que fazem medição por técnicas de tomografia podem ser encontradas. As principais diferenças estão no tempo necessário para a amostragem de dados, na complexidade crescente e flexibilidade decrescente. Assim um tomógrafo de 1ª geração é mais versátil, mas pode levar horas para completar a amostragem; enquanto que já existem tomógrafos de 5ª geração que podem registrar 10 mil quadros por segundo.

[0014] A montagem de tomógrafos industriais em equipamentos de processos industriais não é simples, seja por limitações de montagem, transporte, posicionamento, peso, robustez e segurança.

[0015] O perfil longitudinal da distribuição espacial de densidades dentro do equipamento revela mais informações sobre seu comportamento operacional do que as seções transversais, por isso é importante prover um equipamento que seja capaz de obter esse perfil longitudinal bidimensional em um formato de arquivo que seja passível de reconstituição por imagens de fácil interpretação, com base em uma quantidade de dados otimizada, para não aumentar demasiadamente o tempo de processamento.

[0016] Uma forma de suplantar esta dificuldade e obter resultados mais claros da análise de equipamentos industriais é pela obtenção de

uma distribuição bidimensional (2D) de densidades num plano longitudinal do objeto. O documento BR 102012024416-0 revela um sistema para medir e gerar imagens do perfil de densidades longitudinal de equipamentos industriais por meio da combinação das técnicas de perfilagem por raios gama e reconstrução tomográfica. A distribuição bidimensional de densidades no plano longitudinal proporciona um resultado mais direto, compreensível e, portanto, de melhor aceitação nas refinarias e petroquímicas. A obtenção de dados bidimensionais é viabilizada movimentando-se a fonte radioativa e o detector ao longo do eixo longitudinal do equipamento através de trilhos, e variando-se os ângulos de posicionamento da fonte e do detector, medindo-se a densidades do meio por caminhos diferentes percorridos pelo feixe dentro do meio ou equipamento sendo analisado, como mostrado na figura 2, conforme revelado no documento BR 102012024416-0. Pelo fato dos equipamentos industriais terem um eixo longitudinal muitas vezes maior que suas outras dimensões (largura, profundidade ou diâmetro), a movimentação da fonte radioativa selada e do detector de radiação fica, nesse caso, limitada nesta aplicação a um plano.

[0017] O imageamento bidimensional possibilita um avanço na tecnologia de ensaios não destrutivos para equipamentos industriais, por apresentar uma série de vantagens sobre a técnica convencional de perfilagem por raios gama:

[0018] **Dimensão** – a distribuição bidimensional (2D) de densidades facilita a visualização e identificação dos problemas, processos e fenômenos em um equipamento;

[0019] **Visualização** – feições que na tecnologia tradicional (gamma scan) ficariam ocultas, pelos valores de densidade média, podem ser reveladas no imageamento 2D. Do exposto, perfis de densidade ou equipamentos que antes não poderiam ser perfilados por radiação gama, passam a ter possibilidades de avaliação no trabalho de

campo; e

[0020] **Interpretação** – o imageamento 2D possui maior facilidade de apresentação e interpretação do que o método tradicional de perfilagem por raios gama (gamma scan). Isto resulta numa melhor aceitação deste desenvolvimento tecnológico pelo mercado, bem como facilita o treinamento de pessoal técnico nas refinarias e petroquímicas.

[0021] O sistema de acordo com o documento BR 102012024416-0 permite gerar um arquivo de dados, com as informações necessárias e num formato apropriado para a reconstrução de imagem, e gerar um tomograma da região analisada, com indicação de densidades apresentada numa escala de cores bem como uma tabela dos valores dos coeficientes de atenuação de massa (μ) ou densidade (ρ) obtidos.

[0022] Esse sistema do estado da técnica utiliza normalmente apenas uma fonte emissora e um detector de radiação que se deslocam através de um trilho de posicionamento instalado ao longo da superfície externa do equipamento industrial a ser avaliado. A fonte emissora e o detector são montados em suportes que apresentam blindagens (colimadores) que as isolam da radiação de fundo proveniente do meio ambiente. Estas blindagens apresentam janelas ou canais, que são os locais por onde o feixe de radiação sai e entra preponderantemente da fonte radioativa e no detector de radiação, respectivamente. Os suportes podem girar no plano dos eixos da fonte e do detector, permitindo que os canais da colimação sejam posicionados em diversas orientações, de tal modo que a radiação possa ser enviada e medida de diferentes posições.

[0023] Em cada posicionamento, a orientação das janelas tanto da fonte radioativa como do detector de radiação pode ser alterada para fazer com que ocorra um perfeito alinhamento de seus canais colimadores, com mostrado na figura 2. Deste modo, apenas a radiação que atravessa o objeto na direção fonte detector de alinhamento é

medida, evitando-se a leitura da radiação espalhada.

[0024] Essa tecnologia apresenta o inconveniente que o deslocamento da fonte e do detector ficam limitados ao local em que o seu respectivo trilho de posicionamento está instalado, limitando o plano ou a região de avaliação do sistema à posição desses trilhos. Além disso, o sistema do estado da técnica precisa conhecer com precisão o posicionamento da fonte emissora e do detector, e realizar um alinhamento bastante preciso entre eles para obter resultados precisos de medição. O equipamento para ajuste de alinhamento entre fonte e detector, e o controle eletrônico desse equipamento é complexo, difícil e onera o sistema mostrado nesse documento de patente.

[0025] Além disso, o sistema de acordo com essa anterioridade apenas obtém imagens bidimensionais do interior do equipamento, dificultando o diagnóstico de algumas particularidades de operação e a análise dos insumos no seu interior.

OBJETIVOS DA INVENÇÃO

[0026] É objetivo da presente invenção proporcionar um sistema e um processo de imageamento de equipamentos industriais que dispensem o alinhamento angular preciso entre fonte emissora de radiação e detector, que apresentem um baixo custo e maior facilidade de transporte e instalação do equipamento necessário e que permitam uma avaliação mais abrangente e de mais regiões dentro dos equipamentos industriais avaliados, gerando imagens tridimensionais de elevada qualidade e resolução otimizada.

BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[0027] Os objetivos da invenção são alcançados por meio de um sistema de imageamento de equipamentos industriais utilizando técnicas de perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica de imagens, compreendendo:

(a) um subsistema de emissão de radiação com pelo menos

uma fonte de radiação que emite radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento;

(b) um subsistema de detecção de radiação com pelo menos um detector de radiação, o qual detecta a energia da radiação emitida pelo subsistema de emissão de radiação que atravessou o referido equipamento industrial;

(c) meios de processamento e imageamento que recebem e avaliam as amostras de radiação detectadas pelo subsistema de detecção de radiação e geram um tomograma da região analisada,

[0028] em que os meios de processamento e imageamento selecionam as amostras de radiação detectadas com valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e gera uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base nessas amostras de radiação selecionadas.

[0029] O referido ângulo de espalhamento máximo pode ser, por exemplo, menor ou igual a 25°, a faixa de valores de energia das amostras selecionadas pode ser definida como

$$E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$$

[0030] em que

[0031] E_M = energia da amostra medida;

[0032] E = energia característica da fonte de radiação; e

[0033] TH_i = limite de variação de energia inferior, e

[0034] TH_s = limite de variação de energia superior.

[0035] O subsistema de detecção pode compreender uma pluralidade de detectores de radiação instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial. O subsistema de emissão e o subsistema de detecção preferivelmente estão instalados na superfície externa do equipamento industrial a uma

distância fonte-detector D perpendicular ao eixo longitudinal do equipamento, e formando um ângulo relativo α entre eles, sendo que a distância fonte-detector D e o ângulo relativo α são conhecidos pelos meios de processamento e imageamento e usadas na reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial. Por exemplo, o ângulo relativo α entre a fonte e o detector para medição da energia da radiação que atravessa o equipamento industrial pode ser menor ou igual a 45° .

[0036] A pelo menos uma fonte e o pelo menos um detector são deslocáveis longitudinalmente ao longo do equipamento industrial, respectivamente, em passos da fonte P_f e passos do detector P_d que, de acordo com uma modalidade da invenção, podem ser menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector D . A fonte e o detector podem compreender, cada um, um colimador.

[0037] Os objetivos da invenção são também alcançados por um processo de imageamento de equipamentos industriais utilizando um sistema do tipo aqui descrito, o processo compreendendo as seguintes etapas:

[0038] emitir radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento;

[0039] detectar a radiação emitida que atravessou o referido equipamento industrial;

[0040] selecionar as amostras de radiação detectadas que possuam valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e

[0041] gerar uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base apenas nessas amostras de radiação selecionadas.

[0042] Em uma modalidade da invenção, o referido ângulo de

espalhamento máximo é menor ou igual a 25° , e a faixa de valores de energia das amostras seleccionadas é definida como $E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$, em que

[0043] E_M = energia da amostra medida;

[0044] E = energia característica da fonte de radiação; e

[0045] TH_i = limite de variação de energia inferior, e

[0046] TH_s = limite de variação de energia superior.

[0047] A etapa de detectar a energia da radiação emitida pode ser realizada por uma pluralidade de detectores de radiação instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial, os quais detectam a radiação emitida por pelo menos uma fonte de radiação. Durante a emissão e a detecção de radiação, pode-se deslocar a pelo menos uma fonte e o pelo menos um detector longitudinalmente ao longo do equipamento industrial, respectivamente, em passos da fonte (P_f) e passos do detector (P_d), em que os passos da fonte (P_f) e os passos do detector (P_d) são menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector (D) tomada perpendicularmente ao eixo longitudinal do equipamento. Na etapa de geração de uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial, podem ser geradas imagens tridimensionais.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

[0048] A presente invenção será, a seguir, mais detalhadamente descrita com base em um exemplo de execução representado nos desenhos. As figuras mostram:

[0049] Figura 1 - é uma vista esquemática de um subsistema de emissão de radiação e um subsistema de detecção de radiação usados em sistemas de imageamento de equipamentos industriais;

[0050] Figura 2 - é uma vista esquemática de um sistema de imageamento de equipamentos industriais do estado da técnica;

[0051] Figura 3 - é uma vista esquemática de um sistema de

imageamento de equipamentos industriais de acordo com a invenção;

[0052] Figura 4 - é uma vista superior de um equipamento industrial mostrado na figura 3, com detectores instalados em diversas posições da sua superfície externa;

[0053] Figura 5 - é um gráfico exemplificativo de um espectro da energia da fonte de radiação que é detectada por um detector do sistema de acordo com a invenção;

[0054] Figura 6 - é um gráfico exemplificativo do volume dentro do equipamento industrial correspondente à radiação detectada pelo detector do sistema, a qual é selecionada para gerar a imagem tomográfica do equipamento; e

[0055] Figura 7 - é uma vista esquemática da região dentro do equipamento industrial analisada pelo sistema e pelo processo de acordo com a invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS FIGURAS

[0056] O sistema de imageamento de equipamentos industriais de acordo com a invenção utiliza das técnicas de perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica de imagens. Como pode ser visto na figura 1, o sistema de acordo com a invenção compreende um subsistema de emissão de radiação 1 e um subsistema de detecção de radiação 2.

[0057] O subsistema de emissão 1 possui pelo menos uma fonte de radiação 6 que emite radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento. Essa fonte de radiação pode ou não ser selada. Exemplos de fontes de radiação aplicáveis ao sistema de acordo com a invenção são fontes radioativas emissoras de radiação gama de energias mais elevadas compreendendo Césio-137 ou Cobalto-60, não limitados a estes, que são os radioisótopos tipicamente empregados para a gamagrafia de equipamentos industriais.

[0058] O subsistema de detecção de radiação 2 compreende pelo

menos um detector de radiação 7, o qual detecta a radiação emitida pelo subsistema de emissão de radiação 1 que atravessou o referido equipamento industrial, como mostrado na figura 1. Exemplos de detectores de radiação empregados no sistema de acordo com a invenção são detectores cintiladores de CsI(Tl) ou de NaI(Tl), por sua maior eficiência de contagem. Eles tipicamente estão conectados a meios de amplificação e discriminação de sinais, resultando em um típico subsistema de detecção de radiação, que é constituído, portanto, pelos seguintes componentes: detector cintilador, pré-amplificador, amplificador, módulo de discriminação de pulsos, módulo de alta voltagem, módulo de alimentação, temporizador, contador, módulo de comunicação, conectores e cabos.

[0059] Tanto a fonte de radiação 6 como o detector de radiação 7 podem estar acoplados a meios de atenuação, colimação e segurança. Os colimadores ou blindagens isolam a fonte e/ou o detector de radiação de fundos proveniente do meio ambiente, e da radiação espalhada. Estas blindagens apresentam janelas ou canais, que são os locais por onde o feixe de radiação sai e entra preponderantemente da fonte radioativa e no detector de radiação, respectivamente. Nesses casos, o detector 7 e a fonte 6 são preferivelmente acoplados a suportes que podem girar no plano dos eixos da fonte e do detector, permitindo que os canais da colimação sejam posicionados em diversas orientações, de tal modo que a radiação possa ser enviada e medida de diferentes posições. No entanto, para que essa colimação seja feita de forma eficaz, é preciso que o sistema de acordo com a invenção ajuste e controle eletronicamente a orientação das janelas tanto da fonte radioativa como do detector de radiação, para fazer com que ocorra um perfeito alinhamento de seus canais colimadores. Isso aumenta a complexidade do sistema, pois exige a instalação dos colimadores em suportes rotativos, e meios de controle e ajuste combinado das posições

dos colimadores na fonte e no detector. Portanto, esses colimadores ou blindagens não são necessários para o funcionamento do sistema.

[0060] Preferivelmente tanto a pelo menos uma fonte 6 como o pelo menos um detector 7 são instalados diretamente sobre a superfície externa do equipamento industrial em análise. De acordo com uma modalidade da invenção, o subsistema de detecção compreende uma pluralidade de detectores 7 de radiação instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial, como mostrado na figura 4. Nesse caso, o sistema efetuará leituras e imageamento dos planos longitudinais representados pelas linhas que ligam a fonte e os detectores, permitindo a formação de imagens tridimensionais.

[0061] A fonte de radiação 6 emite, então, uma radiação ionizante sobre o equipamento industrial, que atravessa e é atenuada pelo equipamento em estudo. Com base na lei de Beer-Lambert [$I = I_0 \cdot f(\mu, x)$] descrita nos princípios da tomografia no início desse documento, a atenuação sofrida pela radiação depende da densidade (ρ) ou dos valores dos coeficientes de atenuação de massa (μ) do meio, ou seja, do equipamento e da matéria contida dentro dele que é atravessada pela radiação até chegar ao detector. A atenuação depende também do tamanho do caminho percorrido. Usando reconstrução tomográfica, obtém-se a distribuição desta propriedade dentro de uma região em análise, com um número limitado de medidas.

[0062] Os valores de atenuação da radiação medidos permitem que um perfil de densidades longitudinal médio do equipamento seja obtido, a partir do qual será gerada a reprodução tomográfica por imagem. Para cada posição, ou caminho, a função da atenuação da radiação pode ser dada como uma seqüência de atenuações de elementos de tamanhos finitos, que resulta num produto de funções.

[0063] Em geral, uma seção longitudinal é reduzida a uma matriz de

“m” linhas por “n” colunas. Após as radiações iniciais atravessarem esta matriz (m x n), obtêm-se todas as medidas das radiações atenuadas em cada um dos pontos (m x n) da matriz. Cada onda eletromagnética (raio gama ou raio X) que atravessa um determinado número de células desta matriz, sofreu alguma atenuação medida pelo detector de radiação. A resolução analítica ou iterativa, que determina a propriedade de cada um destes elementos, é o que trata a reconstrução tomográfica da imagem.

[0064] Como pode ser visto na figura 3, a fonte emissora de radiação e o detector estão instalados na superfície externa do equipamento industrial a uma distância fonte-detector D medida perpendicularmente ao eixo longitudinal do equipamento. A ou cada fonte 6 e o ou cada detector 7 formam um ângulo relativo α entre eles, em cada posição que assumirem ao longo do eixo longitudinal do equipamento.

[0065] A fonte 6 e o detector de radiação 7 podem ser movidos ao longo dos caminhos mostrados como “f” e “d” nas figuras 1 e 3. Esse deslocamento pode ser feito ao longo de guias instaladas sobre a superfície externa do equipamento, ou pode ser feito também manualmente. Alternativamente, podem ser dispostos diversos detectores em várias posições longitudinais e/ou periféricas da superfície do equipamento, e apenas a fonte pode ser movida. Ou ainda podem ser instaladas diversas fontes sobre o equipamento, no entanto o aumento do número de fontes e detectores pode onerar demasiadamente o equipamento.

[0066] Para que o sistema funcione adequadamente no sentido de obter a resolução desejada na reprodução tomográfica por imagem, é importante que os deslocamentos ou as distâncias entre cada posição de leitura dos detectores sejam controlados e conhecidos. Cada fonte e detector são deslocados em medidas determinadas chamadas de

passos da fonte Pf e passos do detector Pd. Preferivelmente, os passos da fonte Pf e os passos do detector Pd são menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector D, para se garantir a boa qualidade da imagem gerada. O uso de passos menores pode ser desejado ou até necessário, quando se busca uma resolução mais elevada da imagem da reprodução tomográfica, reproduzindo em maior grau de detalhes o perfil de densidades interno do equipamento. Nesses casos, o tempo de leitura e de processamento são substancialmente elevados. Por isso é ideal realizar um ajuste e uma configuração prévios do sistema, para atender à necessidade de cada aplicação.

[0067] Também foi demonstrado experimentalmente que o ângulo relativo ótimo α entre a fonte e o detector para medição da energia da radiação que atravessa o equipamento industrial deve ser ao redor de 45° , para se garantir adequada resolução e qualidade aceitável da imagem tomográfica obtida. A distância fonte-detector D e o ângulo relativo α são preferivelmente conhecidos e controlados pelos meios de processamento e imageamento 5 do sistema, mostrados na figura 1, principalmente nos casos em que o deslocamento da fonte e dos detectores é controlado eletronicamente pelos meios de processamento e imageamento 5.

[0068] A figura 7 mostra de forma esquemática um equipamento industrial para análise de acordo com uma modalidade da invenção que utiliza um ângulo relativo máximo α entre a fonte e o detector igual a 45° . De acordo com a invenção podem ser usados outros valores de ângulos relativos selecionados em função do equipamento analisado, e de parâmetros de configuração e operação do sistema e do processo de acordo com a invenção. A distância fonte-detector D corresponde à largura do equipamento. Nessa modalidade da invenção, a região central marcada como região de interesse começa e termina a uma distância D/2 acima ou abaixo das extremidades em que as medições

começam ou acabam de ser feitas. Isso porque a qualidade da imagem obtida é pior nas partes centrais superior e inferior envolvidas com linhas tracejadas, pois nessas partes há menos cruzamentos das linhas correspondentes às radiações emitidas pelas fontes e detectadas pelos detectores, o que significa que menos informações são obtidas sobre aquelas partes. Além disso, essa figura permite notar que se um ângulo relativo máximo α muito grande for utilizado, praticamente não se obtém contagens de amostras de energia detectada, já que a distância fonte detector torna-se maior e o meio é muito denso.

[0069] Os meios de processamento e imageamento 5 possuem processadores e softwares adequados para avaliar a radiação detectada pelos detectores, e para gerar tomogramas das regiões analisadas. Os meios de processamento e imageamento 5 são, portanto, conectados à saída do subsistema de detecção 2, de modo a receber as informações de radiação detectada pelo detector de radiação ou pelos múltiplos detectores de radiação instalados no equipamento industrial.

[0070] Os meios de processamento e imageamento 5 preferivelmente também controlam a radiação emitida pela fonte de radiação 6, pois o conhecimento da radiação emitida é importante para a identificação da atenuação sofrida após ela atravessar o equipamento industrial.

[0071] Como é sabido por técnicos no assunto, a radiação emitida por uma fonte se espalha no meio. Alguns feixes de radiação (chamados de fótons não atenuados) percorrem um caminho direto entre a fonte e o detector e são os de maior interesse na reprodução tomográfica realizada pelo sistema da presente invenção, pois sua quantidade depende apenas das atenuações em decorrência da densidade do meio atravessado, e do comprimento do caminho percorrido. Outros feixes (chamados de radiação espalhada) sofreram desvios e reflexões ao

longo do caminho, antes de serem detectados pelo detector. Os desvios e reflexões sofridos interferem no computo da radiação detectada, de modo que ela deixa de ser uma função direta do caminho percorrido e da densidade do meio. Essa radiação espalhada é, portanto, de menor interesse para a reprodução tomográfica.

[0072] Apenas para uma melhor compreensão dos fundamentos dessa invenção, a energia característica E da fonte, ou seja, a energia do fóton emitido pela fonte, é dada pela equação $E=h\nu$, em que ν é a frequência do fóton e h é uma constante.

[0073] Quando o fóton sofre espalhamento, a energia medida do fóton espalhado é dada pela seguinte equação:

$$E_M = h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

[0074] em que o ângulo θ é o ângulo de espalhamento ou desvio do fóton em relação ao caminho direto e retilíneo do fóton saindo da fonte. Portanto, o ângulo de espalhamento interfere na energia medida do fóton detectado E_M após espalhamento, juntamente com as atenuações devidas à densidade do meio e à distância percorrida, conforme discutido aqui anteriormente.

[0075] A figura 5 mostra um gráfico relacionando a quantidade de amostras de radiação detectadas por um detector e a energia dessas amostras, formando um espectro de energias detectadas. O valor E mostrado no gráfico corresponde à energia característica da fonte radioativa. As amostras em torno do valor E de energia característica da fonte radioativa normalmente correspondem à radiação com menor espalhamento e, portanto, representam melhor a variação de densidade do meio atravessado. As amostras que constam da região mais para a esquerda do gráfico, próximas ao eixo das ordenadas, são de menor energia, o que significa que sofreram maior espalhamento, ou podem ser procedentes de outras origens no meio em avaliação.

[0076] Uma forma de se utilizar apenas as amostras de energia detectadas que não sofreram ou sofreram apenas um grau aceitável de espalhamento é fazendo a seleção apenas das amostras em uma janela ou faixa de valores em torno do valor E no gráfico.

[0077] A janela de valores em torno do valor de E , como mostrado na figura 5, correspondente à faixa de energia que se quer observar, de tal modo que apenas as amostras de radiação medidas dentro dessa janela devem ser levada em conta na avaliação para reprodução tomográfica. Essa faixa de valores de energia das amostras corresponde a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, o qual é aceitável para a reprodução tomográfica. A ilustração gráfica da figura 6 mostra um volume de perfil amendoado que envolve a radiação medida pelo detector, radiação essa que possui ângulo de espalhamento máximo de 25° , valor usado nesta modalidade do sistema de acordo com a invenção. Porém, é possível usar outros valores de ângulo de espalhamento máximo que podem variar com o tipo de fonte e outros requisitos do sistema e do equipamento em análise.

[0078] Olhando-se para o gráfico da figura 5, a janela ou faixa de valores é formada ao redor do valor da energia característica da fonte E , e entre os limites de variação de energia inferior TH_i e superior TH_s . Essa janela corresponde à faixa de valores de energia das amostras selecionadas para a reprodução tomográfica. Dessa forma, os meios de processamento e imageamento 5 são configurados para selecionar apenas as amostras de energia medida E_M que atendam à relação $E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$, ao passo que as demais amostras são descartadas. Os limites de variação de energia inferior TH_i e superior TH_s representam, portanto, aos valores de energia das amostras com o ângulo de espalhamento máximo, por exemplo nesta modalidade, de 25° .

[0079] A invenção se refere ainda a um processo de imageamento de equipamentos industriais utilizando um sistema como aqui descrito. Nesse processo, uma radiação é emitida e atravessa o equipamento industrial a ser analisado. A radiação emitida que atravessou o referido equipamento industrial é detectada. É feita uma seleção das amostras de radiação detectadas que possuam valor de energia dentro da faixa de valores correspondente ao ângulo de espalhamento máximo da radiação emitida a partir da fonte de radiação, esse ângulo sendo preferivelmente menor ou igual a 25° . A faixa de valores de energia das amostras selecionadas é preferivelmente definida pela relação $E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$ aqui descrita anteriormente. Uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial é, então, gerada com base apenas nessas amostras de radiação selecionadas.

[0080] A etapa de detectar a energia da radiação emitida pode ser realizada por uma pluralidade de detectores de radiação 7 instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial, os quais detectam a radiação emitida por uma ou várias fontes de radiação 6 do tipo aqui descrito.

[0081] Durante a emissão e a detecção de radiação, a ou as fontes e o ou os detectores são deslocados longitudinalmente ao longo do equipamento industrial, respectivamente, em passos da fonte (Pf) e passos do detector (Pd). Em uma modalidade preferida da invenção, os passos da fonte (Pf) e os passos do detector (Pd) são menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector (D) tomada perpendicularmente ao eixo longitudinal do equipamento. O valor de $1/10$ da distância fonte-detector, até o momento, tem resultado em um bom compromisso entre a qualidade do resultado e o tempo de trabalho. Porém, podem ser usados outros valores de passo a serem selecionados em função do projeto.

[0082] O sistema e o método da presente invenção dispensam,

portanto, a colimação e o alinhamento da fonte e do detector de forma precisa, uma vez que a seleção de amostras de radiação medidas dentro de uma faixa de energia determinada já elimina a leitura de radiações espalhadas e indesejadas. Este efeito resultante da seleção e amostras é, portanto, semelhante ao da colimação feita por colimadores ou blindagens. Porém, a presente invenção alcança uma seleção mais precisa da radiação detectada que é interessante para a reprodução tomográfica, e com uma técnica mais simples, que dispensa componentes que realizem o alinhamento físico perfeito entre fonte e detector, bem como o controle eletrônico desses componentes. Com isso, reduz-se a complexidade do equipamento necessário na montagem do sistema de acordo com a invenção, tornando-o mais simples, leve, portátil, reduzindo também o seu custo.

[0083] O sistema e o processo de acordo com a invenção também viabilizam a instalação de detectores em diferentes planos longitudinais do equipamento a ser analisado, conforme mostrado na figura 4, e o uso simultâneo desses detectores, o que permite a obtenção de imageamento tridimensional de forma também simples e com baixo custo.

[0084] Durante a operação do sistema e do processo de acordo com a invenção os meios de processamento e imageamento 5 podem gerenciar o posicionamento, a aquisição dos dados pelos detectores e o tratamento dos dados da imagem, automatizando a comunicação e o seqüenciamento das etapas de amostragem da radiação detectada.

[0085] Os meios de processamento e imageamento 5 podem realizar os seguintes procedimentos: escolha das dimensões do arranjo físico e os ajustes necessários dos instrumentos para a medição da radiação de interesse, teste e ajuste dos instrumentos para obter uma relação ótima entre eficiência de contagem e precisão das reconstruções tomográficas obtidas a partir das duas técnicas

envolvidas – perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica. Os meios de processamento e imageamento 5 ainda contêm um programa de computador desenvolvido para gerar um arquivo de dados num formato apropriado para a reconstrução de tomogramas da região analisada com indicação de densidades apresentada numa escala de cores, bem como uma tabela dos valores dos coeficientes de atenuação de massa (μ) ou de densidade (ρ) obtidos.

[0086] As tomografias podem ser geradas em qualquer plano seja ele horizontal, vertical ou inclinado, compreendendo tomografias da seção longitudinal, em que a reconstrução é feita diretamente e não a partir da interpolação de outras tomografias, e de seções transversais ou seções inclinadas de equipamentos industriais. Os métodos de reconstrução tomográficos tipicamente empregados incluem ART (Algebraic Reconstruction Technique), MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) e FBP (Filtered Back Projection).

[0087] O sistema e o processo de imageamento da presente invenção podem ser aplicados a diferentes tipos de equipamentos industriais, incluindo, mas não se limitando a, colunas de processo, risers, reatores de leito fixo e fluidizado, trocadores de calor, vasos separadores e tubulações, e a diferentes tipos de internos de equipamentos industriais, incluindo, mas não se limitando a, pratos perfurados, pratos valvulados, pratos multivertedores, pratos de alta eficiência, recheios randômicos e ordenados, pratos coletores e redistribuidores, distribuidores de líquido e vapor, eliminadores de névoa, misturadores fixos e móveis. De maneira similar, a presente invenção também pode ser aplicada a diferentes tipos de processos industriais, incluindo, mas não se limitando a, destilação, separação, adsorção, absorção, refino, purificação, extração, concentração, reação e reação catalítica, transporte de sólidos, líquidos, gases e em leito

fluidizado, troca de calor e massa.

[0088] A facilidade de instalação da fonte e dos detectores permite que a presente invenção seja aplicada em diferentes tipos de processos industriais, compreendendo destilação, separação, adsorção, absorção, refino, purificação, extração, concentração, reação e reação catalítica, transporte de sólidos líquido, gases e em leito fluidizado, troca de calor e massa. Na prática, características dos caminhos, o tempo disponível de teste e o nível de detalhamento desejado determinam a quantidade e o local dos posicionamentos feitos. Em cada posição, é efetuada uma leitura da radiação que atravessa o objeto em estudo, na direção fonte-detector. Ajustes específicos na altura de pulso medida são quem determinam a energia da radiação ionizante medida.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de imageamento de equipamentos industriais utilizando técnicas de perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica de imagens, compreendendo:

(a) um subsistema de emissão de radiação com pelo menos uma fonte de radiação que emite radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento;

(b) um subsistema de detecção de radiação com pelo menos um detector de radiação, o qual detecta a energia da radiação emitida pelo subsistema de emissão de radiação que atravessou o referido equipamento industrial;

(c) meios de processamento e imageamento que recebem e avaliam as amostras de radiação detectadas pelo subsistema de detecção de radiação e geram um tomograma da região analisada,

o sistema caracterizado pelo fato de que os meios de processamento e imageamento selecionam as amostras de radiação detectadas com valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e gera uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base nessas amostras de radiação selecionadas.

2. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o referido ângulo de espalhamento máximo é menor ou igual a 25°.

3. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que faixa de valores de energia das amostras selecionadas é definida como

$$E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$$

em que

E_M = energia da amostra medida;

E = energia característica da fonte de radiação; e

TH_i = limite de variação de energia inferior, e

TH_i = limite de variação de energia superior.

4. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o subsistema de detecção compreende uma pluralidade de detectores de radiação instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial.

5. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o subsistema de emissão e o subsistema de detecção estão instalados na superfície externa do equipamento industrial a uma distância fonte-detector (D) perpendicular ao eixo longitudinal do equipamento, e formando um ângulo relativo (α) entre eles, sendo que a distância fonte-detector (D) e o ângulo relativo (α) são conhecidos pelos meios de processamento e imageamento e usadas na reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial.

6. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o ângulo relativo (α) entre a fonte e o detector para medição da energia da radiação que atravessa o equipamento industrial é menor ou igual a 45° .

7. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma fonte e o pelo menos um detector são deslocáveis longitudinalmente ao longo do equipamento industrial, respectivamente, em passos da fonte (P_f) e passos do detector (P_d), em que os passos da fonte (P_f) e os passos do detector (P_d) são menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector (D).

8. Sistema de imageamento de equipamentos industriais, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma fonte e o pelo menos um detector compreendem, cada um, um colimador.

9. Processo de imageamento de equipamentos industriais utilizando um sistema como definido em qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado por compreender as seguintes etapas:

emitir radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento;

detectar a radiação emitida que atravessou o referido equipamento industrial;

selecionar as amostras de radiação detectadas que possuam valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e

gerar uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base apenas nessas amostras de radiação selecionadas.

10. Processo, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que o referido ângulo de espalhamento máximo correspondente à faixa de valores das amostras selecionadas é menor ou igual a 25°.

11. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 9 ou 10, caracterizado pelo fato de que faixa de valores de energia das amostras selecionadas é definida como

$$E - TH_i \leq E_M \leq E + TH_s$$

em que

E_M = energia da amostra medida;

E = energia característica da fonte de radiação; e

TH_i = limite de variação de energia inferior, e

TH_i = limite de variação de energia superior.

12. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 9 a 11, caracterizado pelo fato de que a etapa de detectar a energia da radiação emitida é realizada por uma pluralidade de detectores de radiação instalados em planos longitudinais distintos na superfície externa do equipamento industrial, os quais detectam a radiação emitida por pelo menos uma fonte de radiação.

13. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 9 a 12, caracterizado pelo fato de compreender, durante a emissão e a detecção de radiação, deslocar a pelo menos uma fonte e o pelo menos um detector longitudinalmente ao longo do equipamento industrial, respectivamente, em passos da fonte (P_f) e passos do detector (P_d), em que os passos da fonte (P_f) e os passos do detector (P_d) são menores ou iguais a um décimo da distância fonte-detector (D) tomada perpendicularmente ao eixo longitudinal do equipamento.

14. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 9 a 13, caracterizado pelo fato de que a etapa de gerar uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial compreende gerar imagens tridimensionais.

RESUMO

Patente de invenção para **"SISTEMA E PROCESSO DE IMAGEAMENTO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS"**

Descreve-se um sistema e o processo de imageamento de equipamentos industriais utilizando das técnicas de perfilagem por raios gama ou raios X e reconstrução tomográfica de imagens, em que (a) um subsistema de emissão de radiação com pelo menos uma fonte de radiação emite radiação que atravessa um equipamento industrial a ser analisado por imageamento; (b) um subsistema de detecção de radiação com pelo menos um detector de radiação detecta a energia da radiação emitida pelo subsistema de emissão de radiação que atravessou o referido equipamento industrial; (c) meios de processamento e imageamento recebem e avaliam as amostras de radiação detectadas pelo subsistema de detecção de radiação e geram um tomograma da região analisada, selecionando as amostras de radiação detectadas com valor de energia dentro de uma faixa de valores correspondente a um ângulo de espalhamento máximo definido da radiação emitida pela fonte de radiação, e gerando uma reconstrução tomográfica de imagens do equipamento industrial com base nessas amostras de radiação selecionadas.

Figura 1

Figura 2

Figura 3

Figura 4

Figura 5

Figura 6

Figura 7

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**